الدار العربية للعلوم
Arab Scientific Publishers

مدخل إلى
جيوديزيا الأقمار الصناعية
وتقدمة مسهبة في نظام التوضُّع العالمي



الدكتور المهندس
هيثم نوري حموي

مدخل إلى

جيوديزيا الأقمار الصناعية

Satellite Geodesy

ونقدمة مُسهبة في

نظام التوضُّع العالمي

Global Positioning System GPS

الدكتور المهندس

هيثم نوري حموي

Dr. techn. Haysam Hamoui

فيينا النمسة

Vienna Austria 1997

كلمة المؤلف:

بسم الله الرحمن الرحيم

السيد القارىء

تُطبّق طرق جيوديزيا الأقمار الصناعية (أو الجيوديزيا ثلاثية الأبعاد) بشكل متزايد في الهندسة المساحية والجيوديزية وكذلك في مجالات أخرى وخاصة في العلوم الجيولوجية والهندسية.

إنّ الهدف من هذا الكتاب هو المساهمة في العمل على توفير وسيلة للإنسان التقني، المهندس، المثقّف وبشكل عام للإنسان المهتمّ في بلادنا العربية، للإطّلاع على إحدى أحدث العلوم التقنية الواسعة التطبيق في مجالات عديدة الإختلاف.

لقد تمّ ترتيب وتوزيع الفصول والمعلومات في هذا الكتاب بحيث يكون أهلا لتبنّيه كمرجع دراسي في الجامعات الهندسية العربية. كما يقدّم هذا العمل مساعدات علمية وعملية جيدة للمهندسين المختصين والمهتمين بتطبيقات جيوديزيا الأقمار الصناعية.

أبدأ بالتطرّق إلى بدايات جيوديزيا الأقمار الصناعية ومجالات تطبيقاتها المختلفة والتعريف بالأنظمة المختلفة للأقمار الصناعية المستخدمة حاليا، ثم أتطرق إلى أساسيات رياضية جيوديزية وأدرج جمل الإحداثيات المرجعية وكذلك المقاييس الزمنية المرجعية المختلفة المهمة في جيوديزيا الأقمار الصناعية. كما أصف بعدها بإختصار ملائم حركة الأقمار الصناعية (التوابع الصنعية) في مدارتها من وجهة نظر علم الميكانيك السماوي.

بعد ذلك أشرح بمزيد من التفصيل (خاصة للزملاء المهندسين والجيوديزيين) نظام التوضع العالمي *GPS* (*Global Positioning System*)، مُركّباته الرئيسية، مبدأ الرصد فيه، الحركة المدارية لأقماره، أخطائه وتصحيحاته، طرق القياس والإستثمار في الحقل والمكتب ...إلخ. هذا النظام قد أصبح طريقة هامة تطبّق بشكل واسع لحلّ كثير من المهمات المساحية والجيوديزية، إضافة لذلك يستخدم هذا النظام في مجالات أخرى عديدة جدا أذكر منها هنا مثلا الملاحة الجوية والبحرية والبرية (*Navigation*)، مراقبة تشوهات القشرة الأرضية (*Crustal Deformation*)، مراقبة تشوهات المنشآت الكبرى (*Deformation Analysis*)، إنشاء الشبكات الجيوديزية و تكثيف حقول النقاط المساحية المرجعية (*Geodetic Control*). كما أتطرّق بالنهاية لذكر أمثلة عن بعض التطبيقات العملية.

لقد عملت قدر الإمكان على تسهيل وإختصار الشرح الرياضي المفصّل دون الإنقاص من كمية المعلومات اللازمة لإستيعاب المواضيع المطروحة، ودون الإضرار بالهدف المتوخّى من هذا الكتاب. كما أرحّب بالملاحظات والإقتراحات البنّاءة من قبل الإخوة القرّاء للعمل على تحسين الطبعة القادمة لخدمة الغرض المذكور بشكل أفضل. آملا أن أكون قد قدّمت بذلك خدمة جيدة للزميل، وللقارئ العربي المهتم والمكتبة العربية بشكل عام.

فيينا *31-May-1997*

الدكتور المهندس هيثم حموي

– الفهرس –

1 – مقدمة *Introduction*

الجيوديزيا هي، حسْب تعريف العالم (*F. R. Helmert*)، علم قياس ورسم سطح الأرض. يتضمّن هذا التعريف تعيين الحقل الخارجي للجاذبية الأرضية، وكذلك تعيين أرضية المحيطات. تعتبر جيوديزيا الأقمار الصناعية (*Satellite Geodesy*) من العلوم الحديثة التي طرأ عليها، خاصة في السنوات الأخيرة، تطورا ملحوظا؛ وهي تتألف من تقنيات القياس والحساب التي تسمح بحلّ المسائل الجيوديزية باستخدام قياسات دقيقة إلى، من، أو بين أقمار صناعية قريبة من كوكب الأرض.

المسائل الأساسية في جيوديزيا الأقمار الصناعية هي:

– تعيين دقيق لنقاط ثلاثية الأبعاد على مستوى عالمي، دولي ومحلي (مثلا نقاط جيوديزية من الدرجة الأولى *Geodetic Control*).

– تعيين حقل الجاذبية الأرضية وتوابع خطية لهذا الحقل (مثلا تعيين دقيق للجيوئيد *Precise Geoid*).

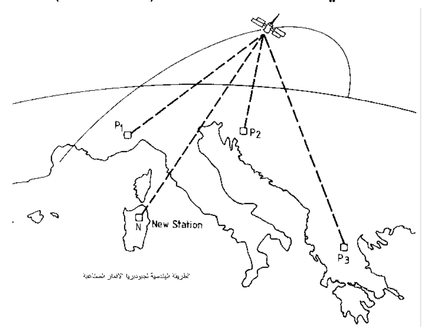
– قياس وإيجاد معادلات لظواهر جيوديناميكية (مثلا حركة القطب *Polar Motion*، دوران الأرض، تشوّه القشرة الأرضية).

إن إستخدام الأقمار الصناعية في الجيوديزيا له متطلبات مسبقة؛ ألا وهي معرفة أساسية واسعة لحركة القمر الصناعي تحت تأثير كافة القوى المؤثرة وكذلك إمكانية تعيين مواقع الأقمار الصناعية ومحطات الرصد الأرضية في إطار مرجعي ملائم. نتيجة لذلك يعود (يمكن تصنيفه) هذا العلم إلى مجال العلوم الأساسية (*Basic Sciences*). ومن ناحية أخرى، عندما تستخدم قياسات أقمار صناعية لحلّ مسائل متنوّعة فإنّ جيوديزيا الأقمار الصناعية تصنّف تحت العلوم التطبيقية (*Applied Sciences*). في حال الأخذ بالإعتبار طبيعة المسائل المعالجة، يمكن تصنيفها تحت العلوم الجيولوجية (*Geosciences*) أو العلوم الهندسية (*Engineering Sciences*).

1.1 المبدأ الأساسي *Basic Concept*

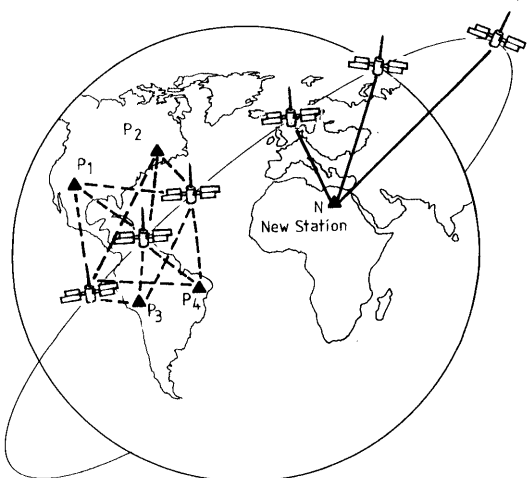
إن أهمية القمر الصناعي في الجيوديزيا تأتي من الإعتبارات التالية:

1– يمكن إستعمال الأقمار الصناعية كأهداف سيّارة عالية، يمكن رؤيتها من مسافات واسعة. بإتّباع المفاهيم التقليدية للشبكات المحيطة بالأرض، يمكن إعتبار الأقمار كنقاط ثابتة ضمن شبكة جيوديزية كبيرة المقياس أو شبكة جيوديزية عالمية ثلاثية الأبعاد. إذا تمّ رصد الأقمار بشكل متزامن من مراصد أرضية مختلفة، فلم يعد مهمّا كون مسارات الأقمار خاضعة لقوى جاذبية. هنا تستخدم فقطْ خاصة كون الأقمار أهدافا بإرتفاع عال. هذه الإعتبارات الهندسية البحتة تقود إلى الطريقة الهندسية للجيوديزيا بواسطة الأقمار الصناعية *Geometrical Method* (شكل *1.1*). طبّقتْ هذه الطريقة مثلا في الشبكة الدولية بواسطة *BC4* كاميرا بين عامي *1966* و *1970* (شكل *1.4*).



شكل *1.1*: الطريقة الهندسية، القمر الصناعي كهدف عال.

2- يمكن إعتبار القمر كمجس *Sensor* في حقل الجاذبية الأرضية. تُرصد حركة المسار وتغيّرات الوسائط التي تحدّده بهدف الحصول على القوى المؤثّرة. العلاقة بين وسائط حقل الجاذبية الأرضية وإنحرافات المسار الحقيقي للقمر عن حركة كيبلر *Keplerian Motion* المثالية لها هنا الأهمية الكبرى (فقرة *3.1.1*). تتلخّص هنا أهمية القمر الصناعي بأنّه جسم متحرّك في حقل الجاذبية الأرضية. هذه النظرة تقود إلى الطريقة الديناميكية للجيوديزيا بواسطة الأقمار الصناعية *Dynamical Method*. ويمكن إعتبار أن القمر الصناعي يحمل إحداثياته الخاصة به وهو يدور في مساره. يتم التوصل لإحداثيات محطة الرصد الأرضية إنطلاقا من المسارات المعروفة للأقمار الصناعية. تسمى أيضا هذه الطريقة طريقة المسار *Orbital Method* (شكل *1.2*).



شكل *1.2*: طريقة المسار، القمر الصناعي كمجسّ في حقل الجاذبية الأرضية ويحمل إحداثياته معه.

1.2 التطور التاريخي لجيوديزيا الأقمار الصناعية Historical Developement of Satellite Geodesy

بدأ التطور المميّز لجيوديزيا الأقمار الصناعية بإطلاق أول قمر صناعي *SPUTMIK-1* بتاريخ *4.10.1957*. إنّ جذور هذا التطور تعود إلى الوراء. إذا إعتبرنا إستعمال القمر الطبيعي للأرض (كوكب القمر)، فإنّ الطريقة الديناميكية المذكورة أعلاه كانت موجودة في القرن التاسع عشر. في عام *1802* عيّن لابلاس *Laplace* تفلطح الأرض (*f=1/303*) إنطلاقا من حركة القمر (حلول أخرى ظهرت فيما بعد، *f=1/296* من *Hamsen 1864*، *f=1/297.8* من *Helmert 1884*، *f=1/297* من *Hill 1884*).

كذلك الأمر تم أيضا تطبيق الطريقة الهندسية لجيوديزيا الأقمار الصناعية *Geometrical Method* سابقا بإعتماد القمر الطبيعي. في هذه الطريقة يُعتبر القمر كهدف هندسي ذو إحداثيات جيومركزية (*Geocentric Coordinates*) معروفة. يتمّ تعيين الإتجاهات بين القمر والراصد من قياسات نسبية إلى نجوم مجاورة. بذلك يتم الحصول على إحداثيات جيومركزية للراصد (في جملة إحداثيات ثلاثية الأبعاد مبدأوها مركز كتلة الأرض، فقرة *2.1.2*).

نظرا لجذور هذا التطور، فقد كان من الممكن الحصول على نتائج بعد إطلاق أوائل الصواريخ والأقمار الصناعية مباشرة. إحدى أوائل النتائج كانتْ تفلطح الأرض *f=1/298.3* وذلك من قياسات القمرين *EXPLORER-1* و *SPUTNIK-2* من أهم الأحداث اللاحقة لعام *1957*:

– *1958* حساب تفلطح الأرض من معطيات الأقمار الصناعية (*f=1/298.3*) وإطلاق القمر *EXPLORER-1 1959*. تعيين شكل الأرض الحقيقي (كالأجّاصة: ليس متناظرا بالنسبة للمستوي الإستوائي) ونظرية حركة الأقمار الصناعية (*Brouwer*).

– *1960* إطلاق القمرين *TRANSIT 1B*، *ECHO-1* وتطور نظرية مسارات الأقمار الصناعية (*Kaula*).

– *1962* إطلاق *ANNA-1B* والربط الجيوديزي بين فرنسة والجزائر (*Institut Geographique National IGN*).

حتى عام *1964* تمّ معالجة عدة مسائل هامة:

– تحديد قيمة عددية دقيقة لتفلطح الأرض.

– تعيين الشكل العام للجيوئيد العالمي.

– تعيين الإرتباطات بين أهمّ الجمل الإحداثية العالمية (بدقّة *± 50 m*).

يمكن تقسيم مراحل تطور جيوديزيا الأقمار الصناعية إلى ثلاثة أقسام رئيسية:

1 – 1958 لغاية حوالي *1970*:

تطور الطرق الأساسية لرصد الأقمار وحسابات وتحليل مداراتها. تميّزت هذه الفترة بتعيين الإتجاهات بواسطة كاميرة تصوير. من أهم النتائج كان إصدار أولى معادلات الأرض من قياسات مركّبات حقل الجاذبية الأرضية (معادلة الأرض النظامية من قبل *Simpthonian Astrophysical Observatory*، *SAO SE I-SE III*، والمعادلة *GEM* من قبل *NASA* (*Goddard Space Flight Center*). تمّ تأسيس الشبكة العالمية (الهندسية) الوحيدة بإعتماد الأقمار الصناعية بقياسات بواسطة كاميرة *BC4* (شكل *1.4*) للقمر الصناعي *PAGEOS*.

2 – 1970 وحتى حوالي *1980*:

وهي مرحلة الأبحاث العلمية. تمّ تطوير طرق قياس حديثة وتنقيحها، خاصة نظام قياس المسافات بالليزر إلى القمر الطبيعي والأقمار الصناعية *SATELLITE LASER RANGING SLR*، وكذلك طريقة قياس الإرتفاعات بواسطة الأقمار الصناعية *SATELLITE ALTIMETRY*. تمّ إستخدام نظام *TRANSIT* لتعيين جيوديزي للنقاط بطريقة دوبلر *DOPPLER* (فقرة *1.4*). وتم التوصّل إلى معادلات محسّنة للأرض (*GRIM*، *GEM 10*) من نتائج قياسات الجاذبية الأرضية. إن دقة الرصد المتزايدة مكّنت من قياسات ظواهر جيوديناميكية (دوران الأرض، حركة القطب، تشوهات القشرة الأرضية، فقرة *4.16.3*).

3 – إعتبارا من عام *1980*:

فترة الإستفادة من تقنيات الأقمار الصناعية في الجيوديزيا، الجيوديناميك والمساحة. في هذه الفترة يمكن ملاحظة الوجهين التاليين بشكل خاص:

– إستخدام الأقمار الصناعية بشكل متزايد من قبل المساحين والجيوديزيين عوضا عن الطرق التقليدية. بدأ هذا بعد الحصول على أولى النتائج من نظام *GPS NAVSTAR Global Positioning System* (فصل *4*).

– الإرتفاع المتزايد لدقة القياس. نتيجة لذلك تم تبديل كامل تقريبا لطرق القياس الفلكية لمراقبة حركة القطب ودوران الأرض بالطرق الحديثة.

1.3 تطبيقات جيوديزيا الأقمار الصناعية *Application fields of Satellite Geodesy*

إن تطبيقات طرق الأقمار الصناعية الجيوديزية تعتمد على الدقة اللازمة، الإمكانيات وكلفة الأجهزة والحسابات. إنطلاقا من المسائل الأساسية المذكورة في الفقرة *1*، يمكن إدراج خلاصة عن التطبيقات الممكنة:

الجيوديزيا العالمية *Global Geodesy*

– الهيكل العام لشكل الأرض وحقل الجاذبية.

– أبعاد وسطية للإهليلج الأرضي.

– إنشاء أنظمة إحداثيات أرضية عالمية.

– جيوئيد مفصّل كسطح مرجعي على الأرض والبحر.

– ربط أنظمة إحداثيات مختلفة.

– ربط أنظمة إحداثيات وطنية بنظام إحداثيات عالمي *Global*.

نقاط مرجعية جيوديزية *Geodetic Control*

– تأسيس نقاطا جيوديزية مرجعية للشبكات الوطنية.

– إنشاء شبكات متجانسة ثلاثية الأبعاد.

– تحليل وتحسين الشبكات الأرضية الموجودة.

– تأسيس أربطة جيوديزية بين مجموعة من الجزر أو مع اليابسة.

– تكثيف الشبكات الموجودة حتى مسافات قصيرة.

جيوديناميك *Geodynamics*

– نقاط مراقبة لحركة القشرة الأرضية.

– حركة القطب، دوران الأرض.

الجيوديزيا التطبيقية والمستوية *Apllied and Plane Geodesy*

– مساحة مستوية تفصيلية (سجل عقاري، مسح الأراضي والأماكن السكنية، أنظمة معلومات جغرافية *GIS*، تخطيط مدن،...).

– أنشاء شبكات ونقاط مرجعية خاصة للمهمات الهندسية.

– نقاط مرجعية أرضية للتصوير الجوي *Photogrammetry* والإستشعار عن بعد *Remote Sensing*.

– موقع وتوجيه *orientation* كاميرات التصوير الجوي.

– نقاط مرجعية أرضية لعلم رسم الخرائط *Cartography*.

الملاحة والجيوديزيا البحرية *Navigation and Marine Geodesy*

– الملاحة الدقيقة للعربات البرية والبحرية والجوية.

– توضّع دقيق في الخرائط البحرية *Marine Mapping*، استكشاف *Exploration*، المساحة البحرية *Hydrography*، رسم المحيطات *Oceanography* والجيوفيزياء.

– توحيد نظام إرتفاعي للمدّ والجزر.

حقول تطبيقات أخرى مشابهة *Related fields*

– تعيين مواضع وسرعات من أجل قياسات جيوفيزيائية (قياس الثقالة الأرضية *Gravimetric*، المسح المغنطيسي والموجي *Magnetic and Seismic Surveying*) في البحر والجو.

– تحديد حركة الجليد ودراسة القطب الجنوبي في علم رسم المحيطات.

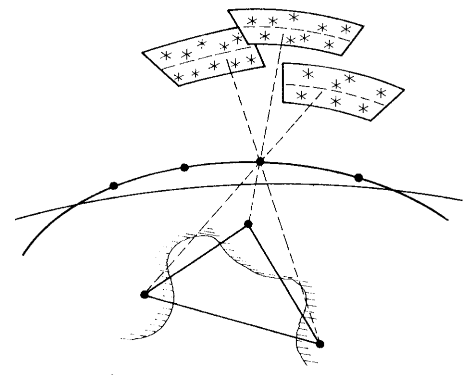
بازدياد عدد الأقمار الصناعية المستخدمة فإن إمكانيات تطبيقاتها غير محدودة تقريبا.

1.4 طرق القياس المختلفة في جيوديزيا الأقمار الصناعية *Observables and Basic Concepts*

هناك طرق تعتمد على قياسات أرضية (من محطة أرضية إلى قمر صناعي)، وطرق تعتمد على قياسات فضائية (من القمر الصناعي إلى الأرض) وطرق أخرى تعتمد على قياسات فضائية بحتة (من قمر صناعي إلى آخر). وتقسم أيضا طرق جيوديزيا الأقمار الصناعية حسب نوعيات القياسات المرصودة. فمنها مايعيّن إتجاهات ومنها مايعيّن أطوالا وطرق أخرى تعين فروق الأطوال. أدرج فيما يلي تعريفا ومثالا لكل نموذج.

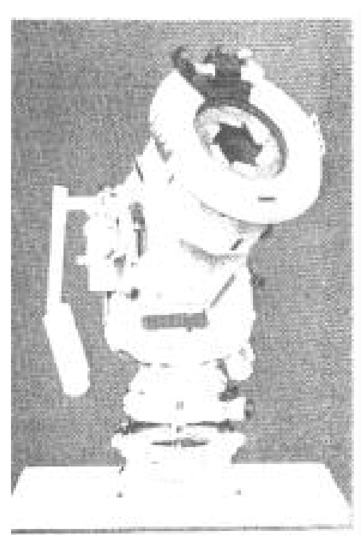
1.4.1 تعيين إتجاهات *Determination of Directions*

يتم تصوير القمر الصناعي والنجوم الواقعة خلفه بواسطة كاميرة تصوير من الأرض. يمكن رؤية القمر عندما يقع تحت أشعة الشمس، أو بواسطة ومضات ضوئية صادرة عنه أو نبضات أشعة ليزر *Laser pulses*. بعملية التصوير يتمّ إسقاط النجوم ومسار القمر على مستوي التصوير قي كاميرا مناسبة (شكل *1.3*).



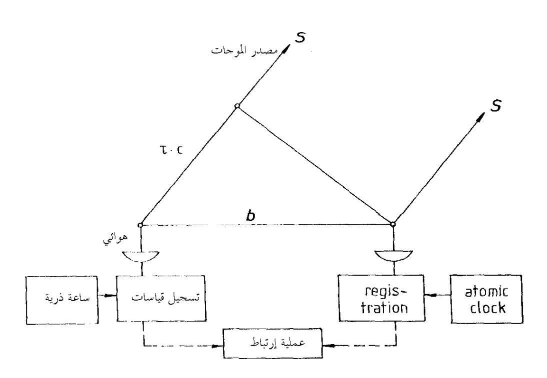
شكل *1.3*: إستخدام الإتجاهات في كاميرات الأقمار الصناعية.

تُقاس الإحداثيات الديكارتية المستوية *x, y* للنجوم ومواقع القمر في مستوي التصوير وتُحول إلى إحداثيات وإتجاهات بين الراصد والقمر الصناعي في نفس النظام المرجعي المعتمد في جداول إحداثيات النجوم (النظام الإستوائي *CIS* شكل *2.2*). يتم بعدها إجراء عملية تحويل الإحداثيات إلى الجملة الإحداثية المرغوبة. مثال على هذه الطريقة هو رصد الأقمار *PAGEOS*، *ECHO1*، *ECHO2* بواسطة كاميرة *BC4* (شكل *1.4*) من قبل ال *NGS* الأمريكية (*National Geodetic Survey*) وذلك بين عامي *1966* و *1970*. تعتبر دقة الطريقة ضعيفة بالنسبة للطرق الحديثة الأخرى حيث أعطت إحداثيات ثلاثية بخطأ قدره $\sigma = \pm 4.5\ m$، وقيست الشبكة مرة أخرى بإدخال محطات رصد غير متجانسة وتم الحصول على دقة أخفض (*3-10 m*).



شكل *1.4*: كاميرا *BC4*.

طريقة أخرى لقياس إتجاهات تعتمد على تحليل موجات الكترومغناطيسية صادرة عن قمر صناعي. هذه الطريقة تعطي دقة قليلة. ولكن طريقة التداخل على القواعد البعيدة جدا *very long baseline interoferemetry VLBI* العالية الدقة تقوم بتعيين الإتجاهات بتحليل الموجات الصادرة عن الأجسام السماوية من المجرات البعيدة *Quasar* (شكل *1.5*).



شكل *1.5*: مبدأ طريقة التداخل على القواعد البعيدة جدا *VLBI*.

إن ماهيّة تلك الأجسام السماوية *quasar* البعيدة غير معروفة بشكل واضح حتى الآن، ولكنها ليست نجوما وتبعد مسافات شاسعة تبلغ حوالي مليارات من السنين الضوئية. مايهم الجيوديزي أنها تؤمن مصدر لإرسال موجات يمكن إعتبار إتجاهاتها متوازية في مختلف مناطق الأرض. بلغت دقة الطريقة *± 2 cm* على مسافة *6000 km* وذلك من قياسات متكررة لفترات قياسات قدرها *24* ساعة. تم التوصل أيضا لدقات عالية بواسطة أبحاث وكالة الفضاء الأمريكية *NASA* التي دامت *10* سنوات بإشراك *80* محطة رصد، وقد تم التوصل إلى إكتشاف سرعات حركة القشرة الأرضية بمقدار ميليمترات بالسنة.

1.4.2 تعيين أطوال *Determination of Ranges*

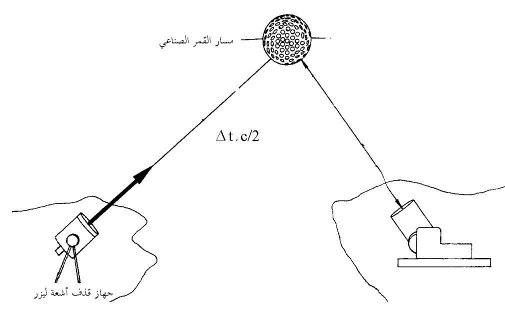
لتعيين المسافات بين أقمار صناعية وراصد يتم قياس زمن إنتشار الموجة الإلكترومغناطيسية بين القمر والراصد. تميّز طريقتين حسب الترددات المستخدمة:

– الأنظمة البصرية (المرئية): تستعمل ضوء الليزر للحصول على قوة إشارة ونوعية جيدة. ولكنها مرتبطة بالظروف الجوية.

– أنظمة الرادار: غير مرتبطة بالظروف الجوية وتُستعمل هنا أطوال موجات بحدود السنتيمتر أو الدسيمتر.

لقياس الأطوال بين الراصد والقمر هناك أيضا طريقتين مختلفتين:

– طرق ذات إتجاهين *two ways methods*: يقاس زمن إنتشار الإشارة بواسطة ساعة دقيقة عند الراصد. القياس الرئيسي هو الزمن الكلي لإنتشار الإشارة Δt (ذهاب وإياب). تحسب المسافة بعدها بإستخدام سرعة إنتشار الموجة c. مثال على تلك الطريقة هي طريقة قياس الأطوال بأشعة الليزر إلى الأقمار الصناعية *Satellites Laser Ranging SLR* (شكل *1.6*).



شكل *1.6*: قياس الأطوال بأشعة الليزر إلى الأقمار الصناعية *Satellites Laser Ranging SLR*.

بلغت دقة قياس الطول (قياس وحيد) في هذه الطريقة *10 mm* بواسطة جهاز *MOBLAS* على القمر *LAGEOS*، و *2-3 mm* بقياسات لفترة دقيقتين.

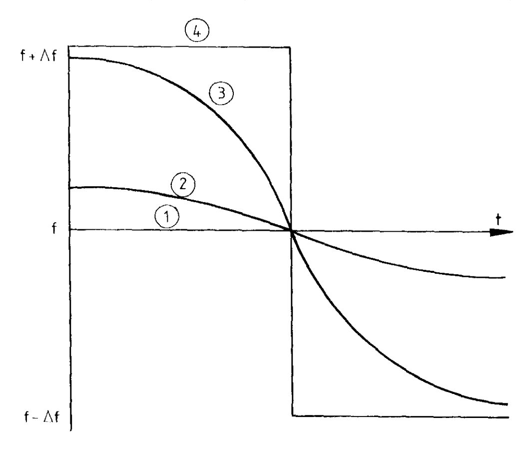
– طرق وحيدة الإتجاه *one way methods*: يقاس زمن إنتشار الإشارة بواسطة ساعة الراصد التي يفترض أن تكون متزامنة بدقة مع ساعة القمر الصناعي (أو يمكن تعيين خطأ التزامن أثناء عملية الحساب). مثال عن هذه الطريقة هي نظام التوضع العالمي *GPS Global Positioning System* (فقرة *4.8*).

تكون طرق القياس هنا إما بقياس النبضة *pulse*، كما في نظام *SLR* أو بمقارنة أطوار الموجات *phases*، كما في نظام *GPS*. في طريقة النبضة يتم تسجيل زمن عودة الإشارة عند تمييز نبضة واضحة.

في طريقة مقارنة الأطوار، إذا كانت الطريقة ذات إتجاهين يقاس التغيّر في طور الموجة العائدة (فقرة *2.3.1.1*)، تتم مقارنة طوري الموجتين الصادرة عن اللاقط والملتقطة. وفي حال الطريقة ذات الإتجاه الواحد يقارن طور الإشارة القادمة من القمر مع طور نسخة من الإشارة الأصلية مولّدة في اللاقط. في الحالتين المذكورتين تكون كمية القياس هي فرق الطور $\Delta\Phi$ الموافق لطول $\Delta\lambda$ (جزء من طول الموجة، فقرة *2.3.1*). العدد الكلي لأطوال الموجات المقطوعة بين القمر والراصد يبقى مجهولا ويدعى الغموض *Ambiguity*. يتم تعيين الغموض بطرق مختلفة، منها حسابية بواسطة برامج مرافقة غالبا للأجهزة المستعملة (فقرة *4.9.3*).

1.4.3 تعيين فروقات أطوال *Determination of Range Differences*

وتدعى أيضا طريقة دوبلر *Doppler*. تعيّن فروقات المسافات من تغيّرات التردد الناتجة عن تغير المسافة بين الراصد والقمر الصناعي (مصدر بث الإشارة) خلال فترة عبور القمر (شكل *1.7*).



شكل *1.7*: مبدأ دوبلر، منحنيات دوبلر من أجل مسافات مختلفة بين الراصد ومصدر الإشارة.

المنحنيان *1* و *2* يمثلان حالة كون الراصد بعيد عن مصدر الإشارة المتحرك بإتجاه الراصد. المنحني *3* يمثل الحالة التقليدية لراصد وقمر صناعي (كمصدر إرسال الإشارة)، المنحني *4* يمثل حالة كون الراصد موجود على مسار مصدر الإشارة (مثلا على مدار القمر الصناعي).

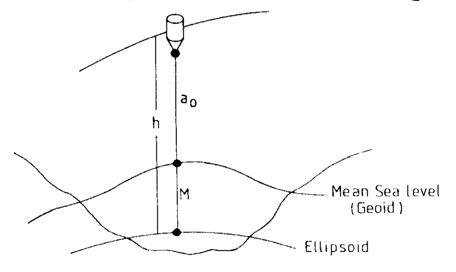
العلاقة التالية تشرح المبدأ الفيزيائي لطريقة دوبلر

$$f_r(t) = f_s\left(1 - \frac{1}{c}\frac{ds}{dt}\right) \qquad 1.1$$

حيث f_s التردد المعروف المُرسَل من القمر، $f_r(t)$ هو التردد الملتقط والمتغير مع الزمن بسبب الحركة النسبية بين القمر الصناعي والراصد على الأرض *ds/dt*. نظام الملاحة ترانسيت *TRANSIT* (جدول *4.1*) هو مثال لهذه الطريقة، وقد طُبّق للأغراض المدنية منذ عام *1967*. تتراوح دقة التعيين المطلق فيه للاقط على الأرض بين *±2-5 m* ودقة تعيين نسبية بحدود *±0.2-0.5 m*.

1.4.4 قياس الإرتفاع بالرادار *Satellite Altimetry*

هناك طريقة خاصة أخرى لقياس المسافات بواسطة الأقمار الصناعية، وهي طريقة تعيين الإرتفاعات بواسطة القمر الصناعي *Satellite Altimetry*. في هذه الطريقة يعيّن إرتفاع القمر الصناعي عن سطح البحر. يحمل القمر قائس المسافات الراداري *radar atlimeter*، ولا توجد محطة رصد أرضية. يعيّن إرتفاع الجهاز عن سطح المحيط a_0 بواسطة قياس زمن ذهاب وعودة نبضة الرادار المرسلة من القمر والمنعكسة من سطح البحر. بمعرفة مسار القمر يتم تعيين الفرق بين السطح الوسطي للبحر والإهليلج المعتمد *M*. وهذا ما يساوي تقريبا إلى إرتفاع الجيوئيد (شكل *1.3*).

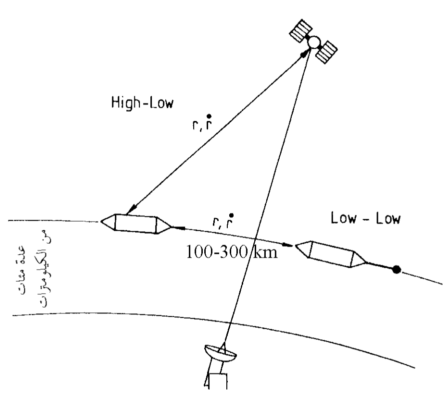


شكل *1.8*: قياس الإرتفاع بالرادار *Satellite Altimetry*.

تستعمل تلك الطريقة لتعيين الجيوئيد على المحيطات (بعد إعتماد تصحيحات مناسبة). بلغت دقة تعيين الجيوئيد المتر الواحد. بمساعدة قياسات هذه الأقمار تم أيضا قياس إنحرافات حقل الجاذبية الأرضية بدقة *6 mGal* (غال: واحدة قياس تسارع الجاذبية الأرضية cm/sec^2، نسبة إلى العالم غاليليه) . يعتبر القمر *Topex/Poseidon* من أحدث الأقمار المستخدمة لهذا الغرض.

4.1.5 قياسات أطوال وفروق أطوال *Determination of Ranges and Range differences*

وتدعى أيضا رصد قمر لقمر *Satellite to Satellite tracking* (شكل *1.9*)، ويمكن أن تُستخدم لمراقبة التغيرات السريعة لحقل الجاذبية الأرضية، نظرا لصغر إرتفاع المدارات عن سطح الأرض. يكون القياس هنا هو أطوال وتغيّرات الأطوال معتمدة على مبدأ دوبلر *Doppler* المنوه عنه أعلاه. يُتوقع الحصول بهذه الطريقة الحديثة على دقة أعلى في دراسة وتعيين حقل الجاذبية الأرضية.



شكل *1.9*: رصد قمر لقمر *Satellite to Satellite tracking*، مع الإستعانة بأقمار ال *GPS*.

كمثال على ذلك مهمة بحث الحقل الثقالي للأرض *Geopotential Research Mission* من قبل وكالة أبحاث الفضاء الأمريكية *NASA* بواسطة الأقمار *GRM1* و *GRM2* على مدارات قطبية دائرية. بإرتفاع *160 km*. القيمة المقاسة هي السرعة النسبية بين القمرين.

في الفصول اللاحقة في هذا الكتاب سوف أقتصر على تقدمة للمبادئ الفيزيائية لحركة الأقمار الصناعية ومن ثم أعرض شرحا موسّعا لنظام التوضع العالمي *GPS* وذلك نظرا للتطور التقني السريع لهذا النظام، دقته، سهولة إستعماله، فعاليته وإتساع مجالات تطبيقاته بشكل واضح، وخاصة في المجالات المدنية. نبدأ أولا بالتذكير ببعض الأساسيات الرياضية وبعرض أنظمة الإحداثيات المرجعية المختلفة وكذلك تعريف بالأنظمة الزمنية المستخدمة في جيوديزيا الأقمار الصناعية حيث أن لها الدور الجوهري في تلك الطرق وخاصة في نظام ال *GPS*.

2 أساسيات Fundamentals

2.1 جمل إحداثيات مرجعية Reference Coordinate Systems

من أجل وصف حركة القمر الصناعي، تشكيل معادلات القياسات وتفسير النتائج، فإن إيجاد جمل إحداثيات مناسبة بشكل جيد له أهمية جوهرية. إن إزدياد دقة طرق القياس المستخدمة يستلزم زيادة في دقة جمل الإحداثيات المرجعية.

إن جمل الإحداثيات المرجعية في جيوديزيا الأقمار الصناعية هي عالمية *Global* وجيومركزية *Geocentric* بطبيعتها، لأن حركة القمر الصناعي تعتمد على مركز كتلة الأرض. القياسات الأرضية هي بطبيعتها محلية *Local* وتعتمد عادة على جمل إحداثيات محلية. العلاقة بين الجملتين (محلية وعالمية) يجب أن تكون معرّفة بدقة كافية. بإعتبار أن الموقع والإتجاه النسبيين للقمر الصناعي يتغيران مع الزمن فإن تسجيل وتعيين زمن القياسات يلعب دورا هاما.

يجدر ذكره أن نتائج طرق الرصد المختلفة في جيوديزيا الأقمار الصناعية تعود إلى جمل إحداثيات مرجعية خاصة بكل طريقة. غالباً تكون العلاقة بين تلك الأنظمة الخاصة معروفة بدقة أقل من دقة القياسات في كل طريقة. إن إيجاد معادلات دقيقة لتحويل الإحداثيات بين أنظمة مختلفة هي من أهم المهام في جيوديزيا الأقمار الصناعية.

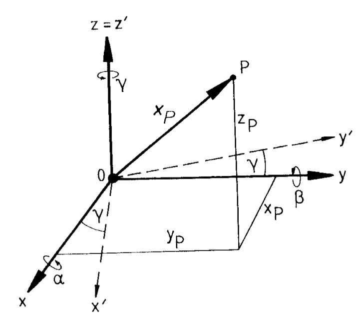
يفرّق بعض المؤلفون بين جملة مرجعية *Reference System* و إطار مرجعي *Reference Frame*. الجملة المرجعية: هي الفكرة *Conceptual Idea*، والتي تتضمن النظرية والإعتبارات الأساسية. الإطار المرجعي: هو التنفيذ العملي للفكرة من خلال قياسات وإحداثيات نقاط مرجعية.

2.1.1 جمل إحداثيات ديكارتية وتحويل الإحداثيات *Cartesian Coordinate Systems and Coordinate Transformations*

في نظام الإحداثيات الديكارتية ثلاثية الأبعاد ($x. y. z$) يعيّن موضع نقطة P بشعاع الموضع:

$$\mathbf{x}_P = \begin{pmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{pmatrix} \quad 2.1$$

حيث أن $z_P. y_P. x_P$ أعداد حقيقية (شكل *2.1*).



شكل *2.1*: نظام إحداثيات ديكارتية.

إن تحويل الإحداثيات إلى نظام إحداثيات ديكارتية آخر ذو المحاور $x`.y`.z`$ و له المبدأ نفسه والناتج عن تدوير النظام الأول بزاوية γ حول المحور z يمكن تحقيقه بواسطة العملية المصفوفية التالية:

$$\boldsymbol{x}'_P = R_3(\gamma)\boldsymbol{x}_P \quad 2.2$$

حيث:

$$R_3(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad 2.3$$

وبتدوير مشابه R_1 حول المحور x و R_2 حول المحور y:

$$R_2(\beta) = \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix}. \qquad R_1(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix}. \quad 2.4$$

إن العلاقات السابقة صالحة لأنظمة الإحداثيات اليمينية (تكون الجملة يمينية إذا كانت الدورانات بالنسبة للمركز عكس دوران عقارب الساعة موجبة).

يمكن تحقيق أي عملية تحويل إحداثيات بواسطة مجموعة من الدورانات. التحويل الكامل يكون:

$$\boldsymbol{x}_P^{```} = R_1(\alpha)R_2(\beta)R_3(\gamma)\boldsymbol{x}_P \qquad 2.5$$

الخصائص الرياضية لمصفوفات التحويل يمكن إيجادها من الجبر الخطي. القواعد التالية لها أهمية كبيرة:

– طول شعاع المكان للنقطة لايتغير بعد التحويل عنه قبل التحويل.

– عملية ضرب المصفوفات ليست عملية تبديلية:

$$R_i(\mu)R_j(\upsilon) \neq R_j(\upsilon)R_i(\mu). \qquad 2.6$$

– عملية ضرب المصفوفات هي عملية مترافقة:

$$R_i(R_jR_k) = (R_iR_j)R_k. \qquad 2.7$$

– عملية الدوران حول المحور نفسه هي عملية تجميعية:

$$R_i(\mu)R_i(\upsilon) = R_i(\mu+\upsilon). \qquad 2.8$$

– مقلوب المصفوفة ومنقولها متساويان:

$$R_i^{-1}(\mu) = R_i^T(\mu) = R_i(-\mu). \qquad 2.9$$

– وكذلك العلاقة التالية تبقى سارية:

$$(R_iR_j)^{-1} = R_j^{-1}R_i^{-1}. \qquad 2.10$$

إن قطبية محاور الإحداثيات يمكن أن تتغير بواسطة مصفوفات الإنعكاس (للتحويل من جملة يمينية إلى يسارية):

$$S_1 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad S_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad S_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}. \qquad 2.11$$

مصفوفة التحويل العام بزوايا دوران γ, β, α:

$$R = \begin{pmatrix} \cos\beta\cos\gamma & \cos\beta\sin\gamma & -\sin\beta \\ \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma & \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma & \sin\alpha\cos\beta \\ \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma + \sin\alpha\sin\gamma & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\cos\beta \end{pmatrix}. \qquad 2.12$$

العلاقة بين شعاعي المكان لنقطة في جملتي إحداثيات مدورتان بشكل كيفي:

$$\boldsymbol{x}^{```}_P = R.\boldsymbol{x}_P \qquad \boldsymbol{x}_P = R^T.\boldsymbol{x}^{```}_P. \qquad 2.13$$

إن زوايا الدورانات تكون غالباً صغيرة جدا في جيوديزيا الأقمار الصناعية *Satellite Geodesy*، لذلك يمكن إستعمال الشكل الخطي للمصفوفة R. بإعتبار $\cos\alpha \cong 1$ و $\sin\alpha \cong \alpha$ (بالراديان)، وبإهمال الحدود ذات الدرجة العليا ينتج:

$$R(\alpha,\beta,\gamma) = \begin{pmatrix} 1 & \gamma & -\beta \\ -\gamma & 1 & \alpha \\ \beta & -\alpha & 1 \end{pmatrix}. \qquad 2.14$$

2.1.2 أنظمة الإحداثيات المرجعية في جيوديزيا الأقمار الصناعية *Reference Coordinate Systems in Satellite Geodesy*

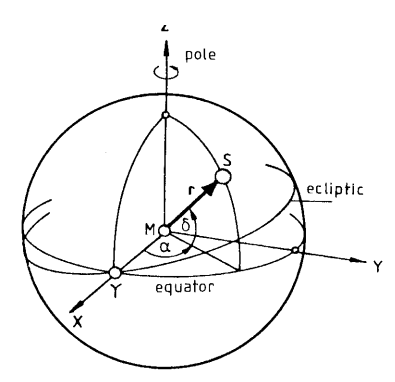
تتطلب جيوديزيا الأقمار الصناعية نظامي إحداثيات مرجعيين مختلفين:

الأول: نظام إحداثي عطالي، مثبت في الفضاء (*spaced fixed inertial reference system CIS*) وذلك لوصف حركة الأقمار الصناعية.

الثاني: نظام إحداثي أرضي، مثبت في الأرض (*earth fixed terrestrial reference system CTS*) وذلك لتعيين مواقع المراصد ووصف نتائج قياسات الأقمار الصناعية.

إن قوانين حركة نيوتن (*Newton*) صالحة في جملة مرجعية عطالية (جملة ساكنة أو متحركة بإنتظام بدون تسارع) إن نظرية حركة الأقمار الصناعية قد تطورت إعتمادا على جملة كهذه (فقرة *3.2*).

كتقريب جيد لجملة إحداثية مرجعية عطالية يُمكن إعتبار الجملة الإستوائية في زمن مُعيّن T_0 المستعملة في الفلك الكروي *Spherical Astronomy* (شكل *2.2*).



شكل *2.2* نظام إحداثيات إستوائية.

حاليا يمكن تحقيق هذه الجملة بالإعتماد على جداول مواقع وحركات لعدد من النجوم الأساسية إضافة إلى مجموعة من الثوابت الفلكية (*Fundamental Katalog FK5*) الذي ينظمه معهد الحسابات الفلكية في *Heidelberg* في ألمانيا. مركز إحداثيات الجملة يُفترض أن يكون مركز كتلة الأرض *M* (*Geocenter*). إتجاه محور *Z* الموجب يُشير بإتجاه القطب الشمالي والإتجاه الموجب للمحور *X* بإتجاه نقطة الربيع γ (وهي نقطة تلاقي المستوي الإستوائي بمستوي دوران الأرض حول الشمس *ecliptic*). المحور *Y* يكمّل الجملة إلى جملة يمينية. تدعى هذه الجملة الجملة العطالية الإتفاقية (*Conventional Inertial System CIS*). وكما تدعى أيضا الجملة العطالية الإتفاقية النجمية (*Stellar CIS*) لتمييزها عن أنظمة عطالية أخرى وذلك لأنها تعتمد على إحداثيات نجوم أساسية. وبإعتبار أن مركز كتلة الأرض يخضع لتسارعات بسبب الحركة السنوية حول الشمس (وبالتالي يتوجب إدخال تصحيحات خاصة) يُطلق عليها أيضا إسم الجملة الشبه عطالية (*quasi-inertial system*). يتم تحويل الإحداثيات الكروية α، δ، r إلى ديكارتية X، Y، Z يتم على النحو التالي:

$$X = r\cos\delta\cos\alpha$$
$$Y = r\cos\delta\sin\alpha \qquad 2.15$$
$$Z = r\sin\delta$$

والعلاقات العكسية:

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$
$$\alpha = \arctan\frac{Y}{X} \qquad 2.16$$
$$\delta = \arctan\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}.$$

يُعرّف *r*، في الفلك الكروي، كنصف قطر الواحدة. يمكن إعتبار الكرة السماوية في الشكل *2.2* ككرة واحدية وتطبيق العلاقات الأساسية للهندسة الكروية.

إن دقّة النظام المرجعي المُشكّل عن طريق جداول ال (*FK5*) هي تقريباً *1*± ثانية. هذه الدقة لاتكفي للمتطلبات الحديثة. يتوقّع الحصول على تحسّن كبير في الدقة عن طريق قمرالقياسات الفلكية *HIPPARCOS*. هناك إمكانية أخرى للحصول على تحقيق أكثر دقة للجملة المرجعية السماوية الثابتة (*spaced fixed inertial system*) وذلك بإستخدام مصادر الموجات الصادرة عن الأجسام السماوية من مجرّات بعيدة (*Quasars*)، تدعى هذه الطريقة طريقة التداخل على القواعد البعيدة جدا *Very Long Baseline Interferometry VLBI* (فقرة *1.4.1*) والتي تستخدم مجاهر الموجات (*Radio Telescopes*). يتم الربط بين ال (*FK5*) و النجوم ذات الموجات الضعيفة عبر مهمات فضائية مثل مجهر الفضاء (*Space Telescope*). إن نظام (*FK5*) المعتمد على الزمن القياسي *J2000* المذكور أدناه، يستعمل منذ الأول من كانون الثاني عام *1988* كجملة عطالية إتفاقية نجمية.

إن جملة مرجعية مثبتة بالأرض (*Earth Fixed Reference System*) يجب أن تكون معينة بدقة ومرتبطة بشكل وثيق بالقشرة الأرضية. يمكن تحقيق جملة أرضية إتفاقية (*Conventional Terrestrial System. CTS*) عبر الإحداثيات الديكارتية لمجموعة من النقاط الأساسية ضمن شبكة عالمية. تعرّف الجملة حاليا عبر الإتجاه الإعتباري لمتوسط إتجاه محور القطب الشمالي (*Conventional Terrestrial Pole. CTP*) و خط الطول الصفري على خط الإستواء (*Greenwich Mean Observatory GMO*).

إن الإنتقال من جملة الإحداثيات السماوية العطالية (*CIS*) إلى جملة الإحداثيات الأرضية الإتفاقية (*CTS*) يتم عبر مجموعة من الدورانات التي تأخذ بعين الإعتبار التأثيرات التالية:

– ظاهرة السبق أو التتابع (*Precession*)

– ظاهرة النوسان (*Nutation*)

– دوران الأرض ومن ضمنها حركة القطب.

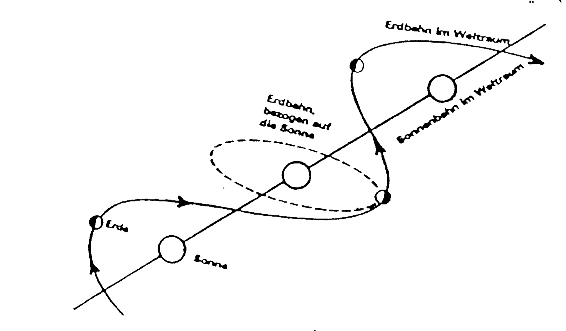
تلك الدورانات يمكن إجمالها بعمليات مصفوفية. من أجل نقطة في الكرة السماوية، معرّفة بشعاع المكان *r*، يمكن كتابة:

$$r_{CTS} = S.N.P.r_{CIS} \qquad 2.17$$

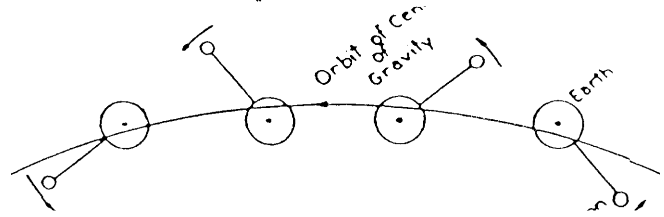
عناصر مصفوفات الدوران يجب أن تكون معروفة بدقة كافية لكل قياس. سوف يتم شرح تلك العناصر بتفصيل أكثر:

– السَبَق (*Precession*) و النوسان (*Nutation*)، P و N في العلاقة *2.17*

قبل الشروع بشرح ظاهرة السَبَق نستعرض حركة الأرض في الفضاء. تقوم الأرض بالجريان أوالدوران في مسار حول الشمس بحركة تدعى الدوران *revolution* وحركة فتل أخرى (تدعى أيضا دوران *rotation*) حول محورها. تتبع حركة الأرض (المركز المشترك لكتلة المجموعة الأرض–القمر) قوانين كيبلر لحركة الكواكب (فقرة *3.1.1*). الشكل *2.2.* يبين تمثيلا لحركة الأرض في الفضاء كما يبين الشكل *2.3* حركة مركز كتل المجموعة (الأرض–القمر) في مدارها.



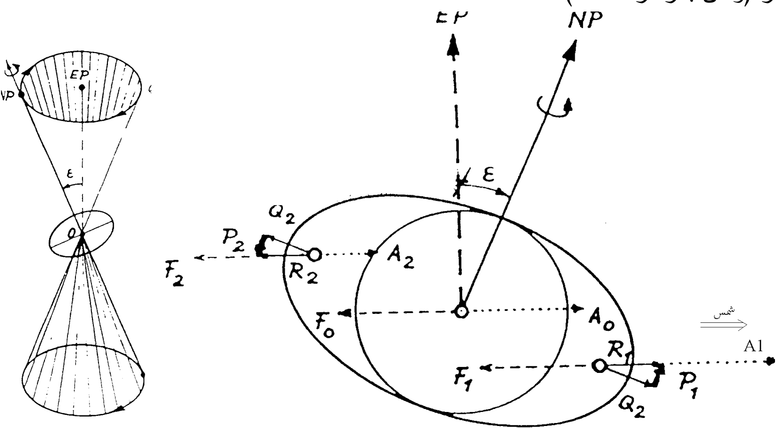
شكل *2.2*: حركة الأرض في الفضاء.



شكل *2.3*: حركة مركز كتل المجموعة (الأرض–القمر) في مدارها حول الشمس.

من الناحية الحركية فإن حركة الأرض هي محصلة حركة إنتقال مركز كتلتها مع حركة دورانها حول محور مار من مركز الكتل هذا. إن تلك المركبتين مستقلتان من الناحية الديناميكية. الدوران الذاتي يجعل الأرض كجيروسكوب *gyroscope* ذو عزم دوراني كبير. يجب إعتبار هذا الجيروسكوب من وجهتي نظر مختلفتين، الأولى كونه حر يتأثر فقط بالقوى الداخلية للأرض ويقود ذلك لظاهرة حركة القطب، والثانية كونه يخضع لقوى خارجية تقود إلى ظاهرتي السبق والنوسان.

نعتبر هنا الأرض ككرة مضافا إليها إنتفاخ إستوائي (شكل *2.4*)، وتخضع لقوى جذب من القمر، الشمس والكواكب الأخرى. تأثير القمر هو الأكبر بسب قربه إلى الأرض. ندرس حاليا تأثير الشمس فقط. تعاني الأرض أثناء حركتها في مسارها من قوتين متعاكستين هما قوة جذب الشمس A والقوة النابذة لحركة الأرض في مسارها حول الشمس F. تنعدم محصلة القوتين في مركز ثقل الأرض *geocenter*. بإعتبار حركة الأرض في مسارها (دون دورانها حول نفسها) تكون القوى النابذة على كل نقاط الأرض متساوية ولها نفس الإتجاه، لأن كل النقاط تتحرك على دوائر بنفس أنصاف الأقطار (ولكن بمراكز مختلفة).



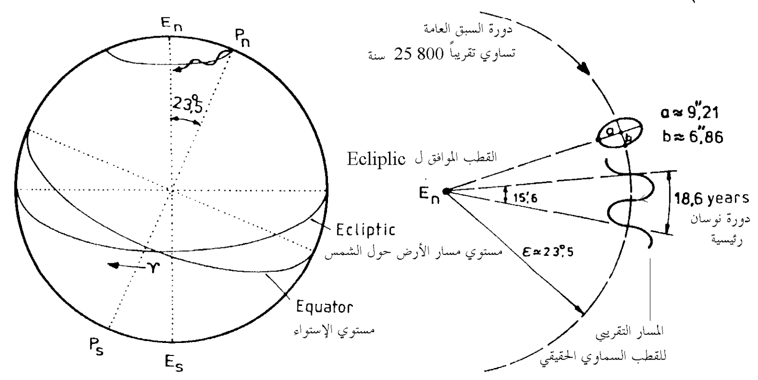
شكل *2.4*: نشوء ظاهرة السبق *precession*.

تكون قوة جذب الشمس لنقاط الإنتفاخ الإستوائي في الجهة المواجة لها أكبر منها في الجهة المقابلة. لنأخذ نقطتين متناظرتين من مستوي الإستواء (شكل *2.4*) ولنشكل المحصلة من الجذب والقوة النابذة $R=A+F$. ينتج محصلتين $R1$ و $R2$ لهما القيمة نفسها ولكن بإتجاهين متعاكسين. يمكن تحليل تلك القوى إلى مركبتين لكل منهما $R=P+Q$. القوى Q تسبب عمليات شد تحاول إطالة الأرض وليس لهما أهمية هنا. القوى P تشكل زوج من القوى يشكل عزم دوراني يريد (تجليس) الأرض وإطباق المستوي الإستوائي *equator* على مستوي مسار الأرض حول الشمس *ecliptic*. تؤثر تلك القوى، المختلفة بالقيمة، على كل أزواج النقاط المتناظرة بالنسبة لمركز الأرض.

في حال عدم دوران الأرض حول نفسها فسوف تستسلم الأرض لمزم الدوران المذكور ويعود مستوي الإستواء إلى ال *ecliptic*، ولكن بفعل الدوران تتصرف الأرض مثل جيروسكوب وتحيد بشكل متعامد على مستوي القوى المؤثرة. يشكل عندها محور الدوران قشرة مخروط دوراني حول الناظم على مستوي مسار الأرض حول الشمس *ecliptic* وعكس إتجاه دوران الأرض وحركتها في مسارها. يقال عندها ان المحور يستبق وتلك الظاهرة تدعى السبق *prscission*. كنتيجة لذلك تتحرك نقطة الربيع على مستوي الإستواء بإتجاء تراجعي وبهذا تزداد قيم الصعود المستقيم *right acsension* للنجوم، حيث يبدو أنهم يسيرون بعيدا (يسبقون) ولهذا أيضا تدعى تلك الظاهرة بالسَبَق.

كنتيجة لظاهرة السبق تتحرك نقطة الربيع وكذلك القطب السماوي، الذين يشكلون المبدأ في أنظمة الإحداثيات. وهذا يعني أن إحداثيات النجوم تتغير بإستمرار. يمكن تمييز مواقع لحظية، وسطية من أجل نقطة زمنية معينة، ووسطية في زمن نظامي مرجعي. إن وصف حركة محور الأرض الحقيقية معقد أكثر، حيث يجب إتخاذ تأثيرات القمر (الذي يساوي ثلثي التأثير الكلي) والكواكب الأخرى (تأثير صغير). تتحرك نقطة الربيع بشكل تراجعي بمقدار″*50.3* ثانية بالسنة. وهذا يعني أن القطب السماوي يكمل دورة كاملة حول قطب ال *ecliptic* بفترة *(360°/50.3″= 25 765)* سنة.

إن القوى المؤثرة على الأرض ليست ثابتة إنما تتغير بشكل دوري لأسباب كثيرة منها مثلا تباعدات متغيرة للشمس والقمر وزوايا إرتفاع (من مستوي مسار الأرض *ecliptic*) متغيرة لهما. لذلك تقسم الحركة إلى مركّبة متزايدة مع الزمن طويلة الأمد *secular* وقسم دوري. المركّبة الأولى فقط تدعى السبق والمركّبة الدورية تدعى النوسان *nutation*. التفريق بينهما تفريق شكلي فقط ولايمكن فصلهما عن بعضهما. كنتيجة للنوسان فإن محور الأرض لايتحرك حركته المدروسة سابقا بشكل واضح إنما يعاني من تغيرات دورية منها قصيرة ومنها طويلة الأمد (تتراوح بين *18.5* سنة و ثلث شهر).



شكل *2.5*: السبق والنوسان: محور دوران الأرض يرسم مخروطا حول القطب الموافق لمسار الشمس الظاهري (*Ecliptic Pole* E_n).

إن مكان وتوجه كل من المستوي الإستوائي ونقطة الربيع (*first point of Aries*) يدعيان الإستواء الوسطي (*mean equator*) و الإعتدال (الربيعي أو الخريفي) الوسطي (*mean equinox*) على التوالي. إذا أُخِذَ النوسان بعين الإعتبار تدعيان عندها الإستواء الحقيقي (*true equator*) والإعتدال الحقيقي (*true equinox*). إحداثيات النجم المرتبطة بذلك تدعى الموقع الوسطي أو الحقيقي. يمكن تحويل المواقع الوسطية لنجم من الزمن المرجعي t_0 (*J 2000*) وفق التاريخ اليولياني إلى زمن الرصد المطلوب t بإستخدام مصفوفة السبق (*preccision matrix*)

$$P = R_3(-z)R_2(\theta)R_1(-\zeta) \qquad 2.18$$

بثلاث دورانات زاوية z-، θ، ζ-:-

$$\begin{aligned} \zeta &= 0^\circ.6406161T + 0^\circ.0000839T^2 + 0^\circ.0000050T^3 \\ z &= 0^\circ.6406161T + 0^\circ.0003041T^2 + 0^\circ.0000051T^3 \\ \theta &= 0^\circ.5567530T + 0^\circ.0001185T^2 + 0^\circ.0000116T^3 . \end{aligned} \qquad 2.19$$

حيث $T=(t-t_0)$ محسوبة بالقرون اليوليانية (*Julian centuries*) ذات *365.25* يوم/سنة (نسبة إلى يوليوس قيصر *Julius cesar*).

نتوقف هنا قليلا لشرح التاريخ اليولياني *JD* (نسبة للباحث *Julius Scalinger* ولا يمت بصلة بيوليوس قيصر)، وهو الفارق الزمني بالأيام الوسطية وأجزاء الأيام المنقضية منذ الأول من كانون الثاني عام *4713* قبل الميلاد وذلك الساعة *12* في غرينويتش. هناك جداول لحساب

التاريخ اليولياني JD (ومعادلة أيضا) فمثلا من أجل 12.12.1994 لدينا JD=2449699.3076. ويعتمد للتسهيل تاريخ يولياني معدل Modified Julian Date MJD وذلك بحذف مقدار

2400 000.5 يوم. وقد تم إعتبار زمن نظامي تعتمد عليه أكثر الجداول الحديثة وهو J2000 أي تستند الحسابات على الإستواء الوسطي ونقطة الربيع الوسطية لعام 2000 ميلادي يوم الأول من كانون الثاني في غرينوتش.

يتم الحصول على الإنتقال من الإستواء والإعتدال الوسطيين إلى اللحظيين من أجل زمن قياس معين عبر مصفوفة النوسان

$$N = R_1(-\varepsilon - \Delta\varepsilon)R_3(-\Delta\psi)R_1(\varepsilon). \qquad 2.20$$

حيث

ε ميلان مستوي مسار الشمس الظاهري Ecliptic ($max \approx 23.3°$)

$\Delta\varepsilon$ النوسان

$\Delta\psi$ النوسان بالإتجاه الطولي (محسوبة في مستوي مسار الشمس الظاهري Ecliptic)، و

$$\varepsilon = 23°26'21''.448 - 46''.815T - 0''.00059T^2 + 0''.001813T^3. \qquad 2.21$$

في عام 1980 تبنّت المجموعة الفلكية الدولية (International Astronomical Union. IAU) نظرية النوسان إعتمادا على معادلة الأرض المطاوعة (elastic earth model). $\Delta\psi$ حسبت بإستخدام نشر سلسلة من 106 عوامل (Coefficients) و $\Delta\varepsilon$ بإستخدام نشر سلسلة من 64 عامل. الحدود الرئيسية هي:

$$\Delta\psi = -17''.1996 \sin\Omega - 1''.3187 \sin(2F - 2D + 2\Omega) - 0''.2274 \sin(2F - 2\Omega) \qquad 2.22$$

$$\Delta\varepsilon = 9''.2025\Omega + 0''.5736 \cos(2F - 2D + 2\Omega) + 0''.0927 \cos(2F - 2\Omega) \qquad 2.23$$

Ω زاوية الزوال الوسطية لعقدة الصعود للقمر (lunar ascending node)

D زاوية الإمتداد الوسطي (elongation) للقمر من الشمس

$$F = \lambda_M - \Omega.$$

تعرف زاوية الإمتداد elongation لكوكب ما بأنها الزاوية بين خط النظر أرض–شمس و خط النظر أرض–كوكب، وتعطي توضيحا للفترة الزمنية التي يمكن رؤية الكوكب بالنسبة لحركة الشمس الظاهرية. إن شرحا أكثر تفصيلا للظواهر المذكورة هنا يخرج عن موضوع وهدف هذا الكتاب.

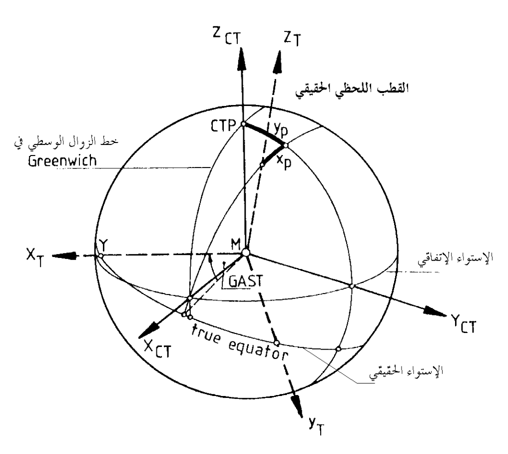
بتطبيق التحويلات 2.18 و 2.20 نحصل على الإحداثيات الحقيقية $r_T = (X_T, Y_T, Z_T)$ في الجملة الإستوائية الحقيقية.

– دوران الأرض وحركة القطب Earth Rotation and Pole Motion (S في العلاقة 2.17)

للإنتقال من نظام إحداثيات لحظي إستوائي مثبّت في الفضاء إلى نظام إحداثيات أرضي إتفاقي نحتاج لثلاث وسائط إضافية تدعى وسائط دوران الأرض Earth Rotation Parameters ERP أو وسائط توجّه الأرض Earth Orientation Parameters EOP وهم: الزمن النجمي الظاهري في غرينويتش Greenwich Apparent Sideral Time GAST (فقرة 2.2.2) وإحداثيات القطب Pole Coordinates x_p,y_p.

على عكس ظاهرتي السبق والنوسان فإن وسائط دوران الأرض لايمكن وصفها بنظرية، إنما يجب أن تعيَّن بقياسات لحظية من قبل جهات دولية مختصة بقياسات الزمن. منذ حوالي الثمانين عاما تعتمد المصادر الدولية على القياسات الفلكية لتحديد تلك الوسائط. إعتبارا من عام 1980 تولى المركز الدولي لخدمة دوران الأرض International Earth Rotation Service IERS هذه المهمة. طرق القياس المعتمدة حالياً هي قياسات مسافات بالليزر SLR إلى أقمار صناعية وإلى القمر الطبيعي. وكذلك طريقة التداخل على القواعد الطويلة جدا VLBI (فقرة 1.4.1).

الشكل 2.6 يبين الحالة الهندسية للتحويل المذكور. يتم تحقيق الجملة المثبتة بالأرض بالتوجيه الإتفاقي لنظام ديكارتي $(X,Y,Z)_{CT}$. المحور Z_{CT} يشير إلى القطب الشمالي الإعتباري Conventional Terrestrial Pole CTP، والمحور X_{CT} إلى خط الزوال الوسطي لمدينة غرينويتش. الموقع النسبي للقطب اللحظي بالنسبة للقطب الإعتباري يدعى عادة إحداثيات القطب x_p,y_p.



شكل *2.6*: جملة الإحداثيات الأرضية اللحظية والإتفاقية

يتعلق التوجّه النسبي للمحور X_{CT} مباشرة بتوجّه الأرض ويُعيّن بواسطة الزمن النجمي الظاهري في غرينويتش *GAST*. مصفوفة التحويل من نظام الإحداثيات الآني الثابت في الفضاء إلى نظام أرضي إتفاقي هي:

$$S = R_2(-x_p)R_1(-y_p)R_3(GAST) \qquad 2.24$$

حيث

$$R_3(GAST) = \begin{pmatrix} cos(GAST) & sin(GAST) & 0 \\ -sin(GAST) & cos(GAST) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad 2.25$$

وبإعتبار الزوايا صغيرة نجد

$$R_2(-x_p)R_1(-y_p) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & x_p \\ 0 & 1 & 0 \\ -x_p & 0 & 1 \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -y_p \\ 0 & y_p & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & x_p \\ 0 & 1 & -y_p \\ -x_p & y_p & 1 \end{pmatrix} \qquad 2.26$$

من أجل التسهيل فإنه يمكن إعتبار القطب في نظام الإحداثيات الإستوائي الفضائي اللحظي الحقيقي منطبقا على القطب السماوي التقويمي *Celestial Ephemeris Pole CEP*. يُعتبر ال *CEP* بأنه القطب المرجعي في حسابات حركة القطب والنوسان.

حتى الوقت الحالي كان القطب الشمالي الإعتباري *CTP* يعتبر منطبقا على القطب الإتفاقي العالمي *Conventional International Origin CIO* الذي يُعرّف بالإتجاه الوسطي لمحور دوران الأرض بين عامي *1900* و *1905*. يعرّف خط الزوال المرجعي في غرينويتش عبر خطوط زوال كل المراصد المساهمة في مركز الخدمة الدولية للزمن *Bureau International de l'Heure BIH*. بدخول طرق القياسات الحديثة بواسطة الأقمار الصناعية وإزدياد عدد المحطات التي تساهم بتعيين الزمن وإحداثيات القطب فإن التعريف المذكور لم يعد صحيحا بشكل عام. حاليا يعيّن النظام الديكارتي الأرضي الإتفاقي *CTS* بواسطة شبكات دولية ذات محطات أساسية تعيّن إحداثياتها بطرق عالية الدقة (*SLR, VLBI, GPS*). تغيرات الإحداثيات الناتجة عن حركات القشرة الأرضية تؤخذ أيضا بعين الإعتبار. النظام الحالي يدعى الإطار المرجعي الأرضي *International Terrestrial Reference Frame ITRF* المُنجز من قبل *IERS* المذكور سابقا.

2.1.3 أنظمة إحداثيات مرجعية في حقل الثقالة الأرضية *Reference Coordinate Systems in the Earth Gravity Field*

القياسات الجيوديزية الأرضية، بإستثناء المسافات المائلة، تكون مرتبطة بشعاع الثقالة المحلي *g*. لذلك يمكن وصف القياسات بنظام إحداثي مرجعي محلّي معتمدا على إتجاه الشاقول *n* في نقطة الرصد *P*. يعيّن عادة إتجاه الشعاع *n* بقياسات فلكية ويمكن وصفه كما يلي:

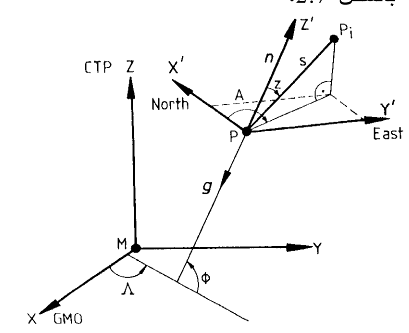
- خط العرض الفلكي Φ و
- خط الطول الفلكي Λ

$$n = \begin{pmatrix} cos\,\Phi\, cos\,\Lambda \\ cos\,\Phi\, sin\,\Lambda \\ sin\,\Phi \end{pmatrix} \qquad 2.27$$

العلاقة بين الجملة الفلكية المحلية، المعرفة بما يلي:

- مبدأ في نقطة الرصد P
- محور Z' موجه إلى السمت الفلكي
- محور X' موجه إلى الشمال (خط الطول الفلكي)
- محور Y' موجه إلى الشرق،

والجملة العالمية الأرضية الإتفاقية *CTS* مشروحة بالشكل *2.7*.



شكل *2.7*: جملة فلكية محلية وجملة ديكارتية عالمية.

موقع نقطة P_i في الجملة الفلكية المحلية يتم إشتقاقها من قياسات أرضية:

- السمت الفلكي A
- إتجاهات أفقية (فروقات في السموت)
- أطوال مائلة s
- زوايا شاقولية z،

ويمكن كتابتها كالتالي:

$$X' = \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} \cos A \sin z \\ \sin A \sin z \\ \cos z \end{pmatrix} \cdot \qquad 2.28$$

يمكن تحويل فروقات إحداثيات مقاسة من جملة فلكية محلية إلى جملة ديكارتية دولية *CTS* كما يلي:

$$\Delta X = A.\,\Delta X' \qquad 2.29$$

$$A = R_3\left(180^\circ - \Lambda\right) R_2\left(90^\circ - \Phi\right).\, S_2. \qquad 2.30$$

المصفوفة S_2 تُغيّر إتجاه المحور Y وتُحوّل بذلك جملة الإحداثيات اليسارية إلى يمينية. المصفوفة A تكتب بالشكل التالي:

$$A = \begin{pmatrix} -\sin\Phi\cos\Lambda & -\sin\Lambda & \cos\Phi\cos\Lambda \\ -\sin\Phi\sin\Lambda & \cos\Lambda & \cos\Phi\sin\Lambda \\ \cos\Phi & 0 & \sin\Phi \end{pmatrix} \cdot \qquad 2.31$$

العلاقة العكسية تكون كالتالي:

$$\Delta X' = A^{-1}.\,\Delta X = A^T.\,\Delta X\,. \qquad 2.32$$

العلاقتين *2.32* و *2.29* تستعملان لربط نتائج طرق القياسات الأرضية وطرق الأقمار الصناعية في كلا النظامين الفلكي المحلي والديكارتي العالمي.

2.1.4 أنظمة إحداثيات إهليلجية مرجعية *Ellipsoidal Reference Coordinate Systems*

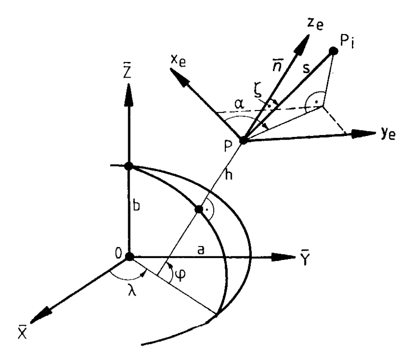
يفضل إستخدام الإحداثيات الإهليلجية في أغلب التطبيقات العملية، لأنها تقارب سطح الأرض الحقيقي وتسهل الفصل بين الموقع الأفقي والإرتفاع. عادة يتم إختيار إهليلج دوراني مفلطح عند القطبين وينشأ من دوران خط زوال القطع الناقص حول محوره الصغير b. الوسائط الهندسية له هي:

نصف القطر الكبير a

التفلطح $f=(a-b)/a$ أو اللامركزية $e^2=a^2-b^2/a^2$. هناك علاقات تربط بين الوسائط:

$$e^2 = 2f-f^2 \qquad 1-e^2 = (1-f)^2$$

أفضل تقريب ممكن لشكل الأرض الكلي هو جملة إهليلجية عالمية (شكل *2.8*).



شكل *2.8*: جمل إحداثيات إهليلجية محلية وعالمية.

الإحداثيات الإهليلجية الجغرافية هي: زاوية العرض الإهليلجية φ. زاوية الطول الإهليلجية λ والإرتفاع الإهليلجي h. يمكن تعريف نظام إحداثي ديكارتي، $\overline{X}\ \overline{Z},\ \overline{Y},$ موافق للنظام الإهليلجي ومعرف كما يلي:

- مبدئه منطبق على مركز الإهليلج
- المحور $\overline{Z}$ موجّه إلى القطب الشمالي للإهليلج (على طول المحور الصغير)
- المحور $\overline{X}$ موجّه إلى إتجاه خط الطول الصفري
- المحور $\overline{Y}$ يكمّل جملة إحداثية يمينية.

معادلة التحويل بين الإحداثيات الجغرافية الإهليلجية h،λ،φ، و الديكارتية ، $\overline{X}\ \overline{Z},\ \overline{Y},$ هي:

$$\overline{\mathbf{X}} = \begin{pmatrix} \overline{X} \\ \overline{Y} \\ \overline{Z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\overline{N}+h)\cos\varphi\cos\lambda \\ (\overline{N}+h)\cos\varphi\sin\lambda \\ ((1-e^2)\overline{N}+h)\sin\varphi \end{pmatrix} \qquad 2.33$$

حيث $\overline{N}$ هو نصف قطر الإنحناء في الشاقول الرئيسي:

$$\overline{N} = \frac{a}{\sqrt{1-e^2\sin^2\varphi}} = \frac{a}{\sqrt{1-f(2-f)\sin^2\varphi}}. \qquad 2.34$$

من أجل المسألة العكسية فإن إحدى الحلول هي:

$$h = \frac{\sqrt{\overline{X}^2+\overline{Y}^2}}{\cos\varphi} - \overline{N}$$

$$\varphi = \arctan\frac{\overline{Z}}{\sqrt{\overline{X}^2+\overline{Y}^2}}\left(1-e^2\frac{\overline{N}}{\overline{N}+h}\right)^{-1}$$

$$\lambda = \arctan\frac{\overline{Y}}{\overline{X}}. \qquad 2.35$$

تحل المعادلة بالتقريب المتتالي. يكون التقارب سريع لأن قيمة h تقارب قيمة N.

إن جملة إحداثية إهليلجية محلية تستند على الشاقول على الإهليلج $\overline{n}$ في نقطة الرصد P، يمكن تعريفها كالتالي:

$$\overline{\mathbf{n}} = \begin{pmatrix} \cos\varphi\cos\lambda \\ \cos\varphi\sin\lambda \\ \sin\varphi \end{pmatrix} \qquad 2.36$$

حيث:

- نقطة الرصد هي مبدأ الإحداثيات
- المحور z_e بإتجاه الشاقول على الإهليلج
- المحور x_e بإتجاه الشمال (الزوال الجيوديزي)
- المحور y_e بإتجاه الشرق مكملا جملة إحداثيات يسارية.

إن موقع نقطة ثانية P_i في نظام الإحداثيات الإهليلجي المحلي يمكن تعيينه عبر القيم التالية (شكل *2.8*):

- مسافات مائلة s
- سموت إهليلجية α
- إتجاهات إهليلجية وزوايا أفقية $\Delta\alpha$

– زوايا شاقولية إهليلجية ζ.

الإحداثيات الكروية المحلية s، α،ζ ترتبط بالإحداثيات الديكارتية المحلية:

$$\mathbf{x}_e = \begin{pmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} \cos\alpha \sin\zeta \\ \sin\alpha \sin\zeta \\ \cos\zeta \end{pmatrix} \quad 2.37$$

من أجل تحويل فروق الإحداثيات من الجملة الإهليلجية المحلية إلى العالمية نحصل على العلاقة

$$\Delta\overline{\mathbf{X}} = \mathbf{R}_3(180^\circ - \lambda)\mathbf{R}_2((90^\circ - \varphi)\mathbf{S}_2\Delta\mathbf{x}_e = \mathbf{A}\Delta\mathbf{x}_e \quad 2.38$$

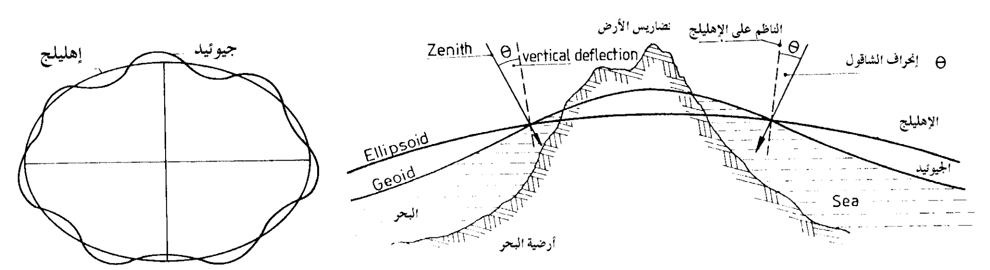
حيث

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\sin\varphi\cos\lambda & -\sin\lambda & \cos\varphi\cos\lambda \\ -\sin\varphi\sin\lambda & \cos\lambda & \cos\varphi\sin\lambda \\ \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \end{pmatrix}. \quad 2.39$$

المعادلة العكسية هي نفس العلاقة *2.32*.

2.1.5 الإهليلج، الجيوئيد ونظام الإستناد الجغرافي المرجعي *Ellipsoid, Geoid and Geodetic Datum*

يتم تقريب الشكل الفيزيائي للأرض الحقيقية للسطح الرياضي للإهليلج الدوراني. إن السطح الإهليلجي مبسط ومؤهل للعمليات الحسابية، ولذلك يستعمل الإهليلج بشكل واسع كسطح مرجعي لإحداثيات أفقية (φ, λ) في الشبكات الجيوديزية. ومن ناحية أخرى فإن الإهليلج غير مناسب كسطح مرجعي للإحداثيات العمودية (الإرتفاعات h). يستعمل عوضا عنه الجيوئيد. يعرّف الجيوئيد سطحاً مستوياً لحقل الثقالة الموافق للمستوى الوسطي للبحر ويمكن أن يمتد إلى داخل جسم الأرض الصلب. وتصحّ هنا مقولة أحد الجيوديزيين الألمان (*Draheim*) التالية: يقوم الجيوديزيون بالقياس على سطح لايمنكهم الحساب عليه (سطح الأرض الطبيعية)، وبالحساب على سطح لايمكنهم القياس عليه (الإهليلج)، وذلك بهدف الحصول على سطح لايمكنهم الحساب ولا القياس عليه (الجيوئيد). العلاقة بين الجيوئيد والإهليلج موضحة في الشكل *2.9*.

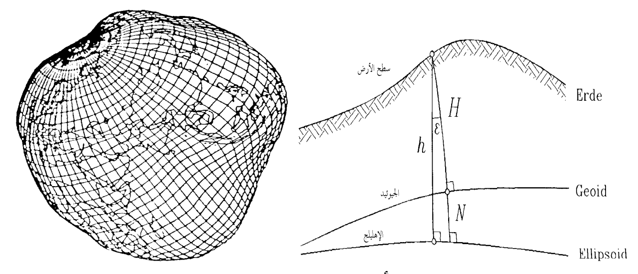


شكل *2.9*: العلاقة بين الجيوئيد والإهليلج.

الفرق العمودي بين الجيوئيد وإهليلج مرجعي معين يدعى إنحراف الجيوئيد *geoid undulation N*. تتعلق القيمة العددية لهذا الإنحراف بالإهليلج المستعمل. من أجل إهليلج دولي يمكن أن تصل قيمة N إلى *100 m*. العلاقة الهندسية بين إنحراف الجيوئيد N، الإرتفاع الإهليلجي h والإرتفاع العمودي H (الذي نحصل عليه من عمليات التسوية) هي بالتقريب (شكل *2.9a*):

$$h = H + N \quad 2.40$$

الشكل *2.9a* يبين أيضا شكل الجيوئيد العالمي، حيث تم تكبير إرتفاعات الجيوئيد *15 000* مرة وذلك بمساعدة الرسم ثلاثي الأبعاد في الكومبيوتر.



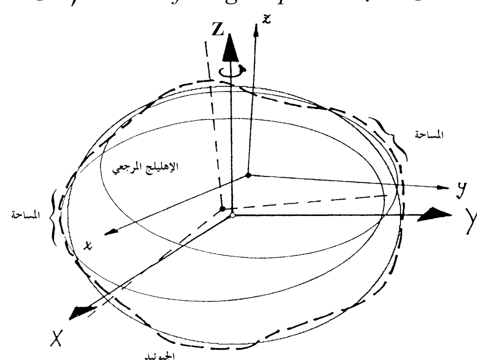
شكل *2.9a*: شكل الأرض الحقيقي وتعريف الإرتفاعات.

إن إنحراف الجيوئيد N يجب أن يكون معروفاً إذا كانت قياسات أقمار صناعية (التي تعطي إرتفاعات إهليلجية) وقياسات جيوديزية أرضية (التي تعطي إرتفاعات في حقل الثقالة الأرضية) مستعملة في عملية تعديل مشتركة.

تدعى الزاوية θ (شكل *2.9*) بين إتجاه العمود على الإهليلج وإتجاه الشاقول بإنحراف الشاقول *Deflection of the vertical* في النقطة المعتبرة *P*. تقسم الزاوية θ عادة إلى مركبتين كالتالي:

$$\zeta = \Phi - \varphi$$
$$\eta = (\Lambda - \lambda)\cos\varphi \qquad 2.41$$

Φ, Λ محسوبة من قياسات فلكية و φ, λ محسوبة من قياسات جيوديزية. لذلك تدعى إنحرافات الشاقول الإنحرافات الجيوفلكية *astrogedetic deflections*. تعرّف الوسائط المعينة لإهليلج محلي عادة بحيث أن توزع إنحرافات معروفة للشاقول تحقق شرط أصغري في عملية التعديل. الإهليلجات المحلية الموافقة هي الإهليلجات الأفضل تناسبا *the best fitting ellipsoids* (شكل *2.10*).



شكل *2.10*: الإهليلجات المحلية المناسبة في مناطق مختلفة من الأرض.

إن نظام إهليلجي عالمي يجب أن يعتمد على إهليلج مرجعي يناسب شكل الأرض الشامل. مبدأ الإهليلج يفترض أن ينطبق على مركز كتل الأرض. إضافة لذلك فإن إتجاهات المحاور الإهليلجية معينة بحيث تكون موازية لمحاور النظام المرجعي الأرضي الإتفاقي (*CTS*). مجموعة الوسائط التي تصف العلاقة بين إهليلج محلي ما ونظام جيوديزي مرجعي عالمي تدعى الإستناد الجيوديزي *gedetic datum*. يعرّف نظام الإستناد الجيوديزي بواسطة مجموعة من خمس عناصر على الأقل:

a نصف طول المحور الكبير للإهليلج المرجعي

f التفلطح

ΔX،ΔY،ΔZ: إحداثيات مركز الإهليلج بالنسبة لمركز الأرض (إنتقالات نظام الإستناد الجغرافي *datum shift parameters*).

من أجل $\Delta X=\Delta Y=\Delta Z=0$ يدعى الإستناد الجيوديزي الإستناد المطلق *absolute datum*. النظام المرجعي الجيوديزي لعام *1980* مثلا يصنّف تحت هذا النموذج. الوسائط الخاصة به هي:

نصف القطر الكبير للإهليلج المرجعي	a	=	$6\,378\,137$ m
التفلطح	f	=	$1/298.2572$
ثابتة الثقالة	GM	=	$398600.5\ km^3s^{-1}$
السرعة الزاوية لدوران الأرض.	ω	=	$7.292115x10^{-5}\ rad\ s^{-1}$

إن إنشاء نظام إستناد جيوديزي محلي لايحقق عملياً محاور موازية للنظام الديكارتي العالمي *CTS*. وهذه هي عمليا الحالة الراهنة في أغلب أنظمة الإستناد الجيوديزية الوطنية. إنطلاقاً من ذلك فإن التحويل من نظام إهليلجي مرجعي إلى نظام إهليلجي آخر يتطلب عمليات دورانات. تجرى تلك التحويلات عادة بين أنظمة ديكارتية. في حال كون التحويلات مطلوبة بالشكل الإهليلجي للإحداثيات فتطبق عندها العلاقات *2.33* إلى *2.35*.

إن معادلة كاملة لتحويل نظام الإستناد بين جملتي إحداثيات ديكارتيتين تتطلب سبعة وسائط (شكل *2.11*):

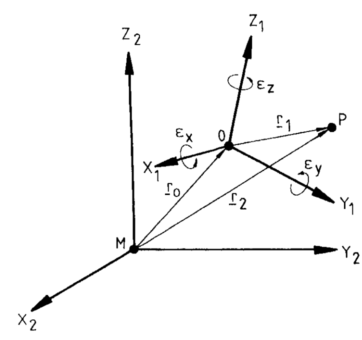
ثلاث إنتقالات للمبدأ ΔX،ΔY،ΔZ

ثلاث دورانات $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$

عامل مقياس m

في أغلب الحالات تكون زوايا الدوران صغيرة جداً، لذلك يمكن أن نكتب:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_2 = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix}_{1,2} + (1+m)\begin{pmatrix} 1 & \epsilon_z & -\epsilon_y \\ -\epsilon_z & 1 & \epsilon_x \\ \epsilon_y & -\epsilon_x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_1 \qquad 2.42$$



شكل *2.11*: تحويل الإستناد الجيوديزي بين جملتي إحداثيات ديكارتيتين.

من أجل مساحات محدودة فإنه يمكن الإكتفاء بإستخدام ثلاث إنتقالات محلية أو إقليمية.

تزداد وسائط الإستناد إلى التسعة إذا توجب أخذ وسائط الإهليلج بعين الإعتبار. يزداد عدد وسائط الإستناد *datum parameters* أيضاً إذا كان يسمح لأجزاء من الشبكة الأرضية بدورانات معينة، وفي حال أن معلومات نظام الإستناد *geodetic datum* مشتقة من مسارات الأقمار الصناعية. في الحالة الأخيرة فإن كلاً من عوامل حقل الجاذبية الأرضية الفعالة وكذلك بعض الثوابت الأساسية (مثل دوران الأرض، سرعة الضوء، ثابتة الثقالة الأرضية) تشكّل جزء من تعريف نظام الإستناد *datum definition*. النظام الجيوديزي العالمي لعام *1984* (*World Geodetic System WGS 84*) وكذلك *WGS 72* هما مثالين عن هذا النوع. العناصر الرئيسية للنظامين موجودة في اللائحة *2.1*.

الوسيط	الإسم	*WGS84*	*WGS72*
نصف المحور الكبير	a	*6378137 m*	*6378135*
التفلطح	f	*1/298.257223563*	*1/298.26*
السرعة الزاوية	ω	$7.292115 \times 10\text{-}5\ rad\ s^{-1}$	$7.292115147 \times 10^{-5}\ rad\ s^{-1}$
ثابتة الثقالة الأرضية	GM	$398600.5\ km^3\ s^{-2}$	$398600.8\ km^3\ s^{-2}$
عامل التوافق المكاني (فقرة *3.2.2.1*)	$\bar{C}_{2,0}$	$-484.16685 \times 10^{-6}$	-484.1605×10^{-6}

لائحة *2.1*: الوسائط الرئيسية لنظامي *WGS84* و *WGS72*.

لتحويل الإحداثيات بين النظامين نتبع المعادلات التالية:

$$\begin{pmatrix} \varphi \\ \lambda \\ h \end{pmatrix}_{WGS84} = \begin{pmatrix} \varphi \\ \lambda \\ h \end{pmatrix}_{WGS72} + \begin{pmatrix} \Delta\varphi \\ \Delta\lambda \\ \Delta h \end{pmatrix} \quad 2.43$$

$$\Delta\varphi[''] = (4.5\cos\varphi)\ (a \sin 1'') + (\Delta f \sin 1'') + (\Delta f \sin 2\varphi / \sin 1'')$$

$$\Delta\lambda[''] = 0.554$$

$$\Delta h[\mathrm{m}] = 4.5 \sin\varphi + a\Delta f \sin^2\varphi - \Delta a + \Delta r \quad 2.44$$

حيث:

$$\Delta f = 0.3121057 \times 10^{-7}$$
$$a = 6\ 378\ 135\ \mathrm{m}$$
$$\Delta a = 2.0\ \mathrm{m}$$
$$\Delta r = 1.4\ \mathrm{m} \quad 2.45$$

إن إحداثيات جيومركزية مطلقة لنقطة معزولة معينة من قياسات أقمار صناعية (*Transit* أو *GPS*) لها عادة إنحرافات معيارية بحدود عدة أمتار أو عشرات من الأمتار. إن تحويل الإحداثيات المذكور في العلاقات *2.43-2.45* لايُحسّن دقّة الإحداثيات.

2.2 الزمن *Time*

2.2.1 إعتبارات أساسية *Basic Considerations*

هناك ثلاثة مجموعات أساسية لمقاييس الزمن والتي لها أهمية في جيوديزيا الأقمار الصناعية:

1- يحتاج المرء لتوجّه الأرض المرتبط بالزمن بالنسبة للنظام العطالي وذلك لربط القياسات الأرضية بإطار مرجعي فضائي *space fixed reference frame*. يتعلق مقياس الزمن المناسب بالدوران اليومي للأرض ويدعى الزمن النجمي *Sidereal Time* أو العالمي *Universal Time*.

2- من أجل وصف حركة القمر الصناعي يحتاج المرء لقياس منتظم ودقيق للزمن كي يستخدم كمتحول مستقل في معادلات الحركة. يمكن إشتقاق مقياس زمن مناسب من مدار الأرض حول الشمس، ويدعى الزمن الحركي *Dynamical Time*.

3- إن القياس الدقيق لزمن إنتشار الإشارات (في نظام *SLR* مثلا، فقرة *1.4.2*) يتطلب مقياس زمني منتظم، سهل وعالي الدقة. المقياس المناسب متعلق بظاهرة من الفيزياء النووية ويدعى الزمن الذري *Atomic Time*.

تعتمد المقاييس الزمنية المذكورة أعلاه على ظواهر فلكية او فيزيائية منتظمة ومتكررة. يشكل المجال الزمني بين ظاهرتين متعاقبتين القيمة المقاسة في المقياس المعتبر. أجزاء أو مضاعفات معينة للقيمة المقاسة تدعى واحدة زمنية *Time Unit*. تستعمل بشكل عام الثانية كواحدة زمنية أساسية، ومنها تشتق واحدات زمنية أكبر كاليوم والسنة. في كل مقياس زمني يجب تعيين نقطة البداية أو مبدأ ثابت. يمكن تحقيق هذا المبدأ من خلال حوادث فلكية معينة مثل مكان معين لنجم، أو عبور جسم سماوي معين خط زوال معين.

يمكن ربط لحظة حدوث قياسات أو ظواهر بقراءة في مقياس زمني معين وبذلك يتم تأريخ الحدث *Datation*. يدعى ذلك في علم الفلك زمن أو فترة القياس *Epoch of Observation*. في مقياس زمني معين فإن تحديد زمن القياس *Epoch* يعطي قياس زمني مطلق *absolute time measurement*. من أجل أغراض متعددة (مثلا تحديد زمن إنتشار إشارة قمر صناعي) يكفي قياس زمن نسبي *relative time measurement* (تعيين الفاصل الزمني بين زمني قياس *epochs*). في حالات كثيرة يكون قياس الزمن النسبي أدق من القياس المطلق. في جيوديزيا الأقمار الصناعية يتم تأريخ الحدث (أو الظاهرة) بواسطة عملية تعليم أو تأشير الزمن *Time Tagging* (مثلا في حال إعتبار لحظة إستقبال أو لحظة إرسال إشارة).

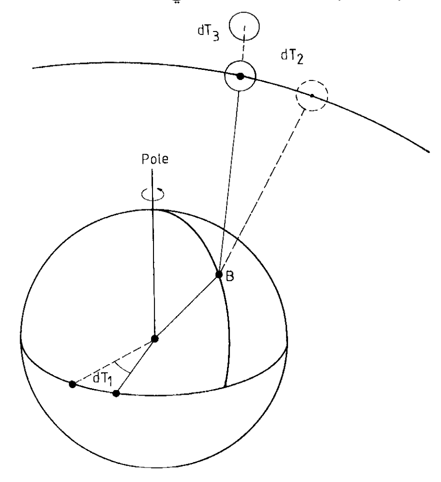
يجب التمييز بين المفهوم المثالي لمقياس زمني ما وتحقيقه عمليا بواسطة قياسات. يتبين ذلك في الزمن الذري، وذلك عندما نقارن بين تعريف الثانية في الزمن الذري وتحقيقها العملي من خلال مجموعة ساعات ذرية. إن مقياس زمني يمكن إعتباره كتقريب للمفهوم الزمني المتعلق به.

للحصول على المتطلبات العلمية والتكنولوجية المتنوعة، يجب أن تكون العلاقة بين المقاييس الزمنية المختلفة معروفة بدقة عالية. الشكل *2.12* يوضح كيف تؤثر أخطاء زمنية في جيوديزيا الأقمار الصناعية متعلقة بخطأ موقع مقداره *1 cm*.

1 cm حركة نقطة على خط الإستواء ناتجة عن دوران الأرض توافق خطأ بحوالي $2x10^{-5}\,s$

1 cm حركة قمر صناعي في مداره تناسب حوالى $1x10^{-6}\,s$

1 cm من المسافة للقمر الصناعي مشتقة من زمن إنتشار إشارته تناسب حوالي $1x10^{-10}\,s$.



شكل *2.12*: تأثير أخطاء الزمن في جيوديزيا الأقمار الصناعية.

متطلبات الدقة اللازمة قي تعيين الزمن تكون كالتالي:

من أجل دوران الأرض $dT1 \leq 2x10^{-5}\,s$

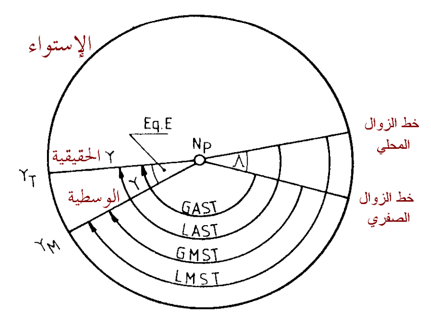
من أجل حركة مدار القمر الصناعي $dT2 \leq 1x10^{-6}\,s$

من أجل زمن إنتشار الإشارة $dT3 \leq 1x10^{-10}\,s$

2.2.2 الزمن النجمي والزمن الدولي *Sidereal Time and Universal Time*

الزمن النجمي والزمن الدولي متعلقان مباشرة بدوران الأرض، ولذلك فهما متكافئين.

يتم تحقيق الزمن النجمي بمراقبة عبورين ذات إرتفاعين أعظميين متعاقبين لنجم معين وذلك في مكان الراصد. الزمن النجمي يساوي الزاوية الساعية لنقطة الإعتدال الربيعي *Vernal Equinox* Υ وبالتالي ترتبط بزاوية الطول الجغرافية لموقع الرصد المعتبر. من الشكل *2.13* نستنتج ما يلي:



شكل *2.13*: تعريف الزمن النجمي.

الزمن النجمي الظاهري (أو الحقيقي) المحلي *Local Apparent Sidereal Time LAST* يعتمد على نقطة الإعتدال الربيعي الحقيقية ويساوي إلى الزاوية الساعية لنقطة الإعتدال الربيعي الحقيقية. من أجل غرينويتش نحصل على *GAST* والذي يساوي إلى الزاوية الساعية لنقطة الإعتدال الربيعي الحقيقية بالنسبة لمدينة غرينويتش. إن نقطة الإعتدال الربيعي تخضع كما رأينا سابقا لتأثير ظاهرة النوسان. بحذف تأثير النوسان نحصل على *Local mean Sidereal Time LMST* (الزاوية الساعية المحلية لنقطة الإعتدال الربيعي) ومن أجل غرينويتش *GAST*. الفرق بين الزمنين النجميين الظاهري والوسطي يحسب من المعادلة الزمنية *Equation of Equinoxes*:

$$\mathrm{GMST} - \mathrm{GAST} = \Delta\psi \cos\epsilon, \qquad 2.46$$

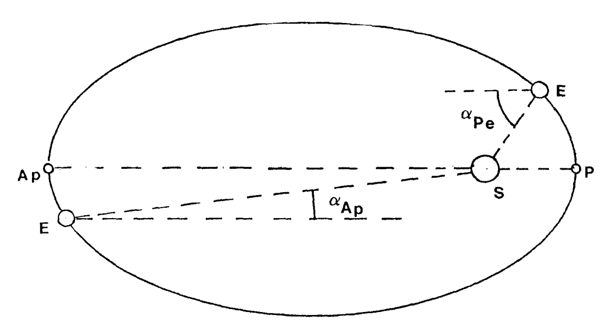
حيث $\Delta\psi$ النوسان *Nutation* في زاوية الطول. *GMST* الزمن النجمي الوسطي في غرينويتش، *GAST* الزمن النجمي الظاهري في غرينويتش. من أجل زاوية الطول Λ للزوال المحلي يكون

$$\mathrm{GMST} - \mathrm{LMST} = \mathrm{GAST} - \mathrm{LAST} = \Lambda. \qquad 2.47$$

يستخدم الزمن الظاهري أو الحقيقي لتقييم القياسات الفلكية في حين يستخدم الزمن الوسطي لإنشاء مقاييس زمنية. الواحدة الأساسية هي اليوم النجمي الوسطي *Mean Sidereal Day* مُعرّفاً بالفارق بين مرورين متعاقبين لنقطة الإعتدال الربيعي عبر الزوال. اليوم النجمي الوسطي لا يساوي تماما فترة دوران كامل للأرض حول نفسها بالنسبة للفضاء العطالي لأن موقع نقطة الإعتدال الربيعي تخضع لتأثير ظاهرة السبق *Precession* المذكورة سابقا، الفرق اليومي هو *0.0084* ثانية حيث اليوم النجمي أقصر.

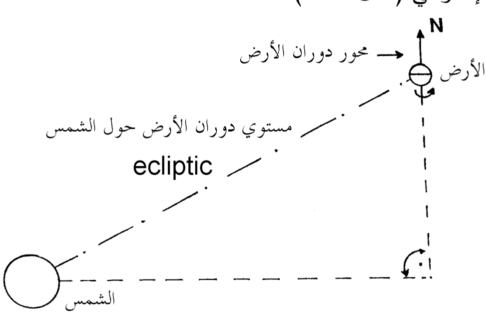
يحتاج المرء عمليا إلى نظام زمني يتبع الحركة اليومية الظاهرية للشمس. إن الزاوية الساعية للشمس الحقيقية تتعرض لتغييرات واسعة خلال السنة ناشئة عن العوامل التالية (تغير زاوية إرتفاع الشمس والشكل الإهليلجي لمدار الأرض):

1 – حسب قانون كيبلر الثاني قي نظرية مسارات الأقمار (فقرة *3.1.1*) فإن سرعة دوران القمر في مساره الإهليلجي تتعلق بموقعه في المدار. هذا يعني أن السرعة المدارية للأرض تكون عالية عندما تكون قريبة من الشمس (*Perihelion*)، وبالتالي فإن اليوم الشمسي يكون أطول منه في حال تواجد الأرض في المنطقة المقابلة (*Aphelion*) (شكل *2.14*). اليوم الشمسي في نقطة ال *Perihelion* تساوي $360°+\alpha_{pe}$ و في نقطة ال *Aphelion* يساوي $360°+\alpha_{Ap}$. لذلك يكون مثلا نصف السنة الشتوي في نصف الكرة الشمالية أقصر من نصف السنة الصيفي بمقدار *7* أيام.



شكل *2.14*: إختلاف طول اليوم الشمسي على مدار السنة.

2 – إن مستوي دوران الأرض حول الشمس (مسار الشمس الظاهري *Ecliptic*) غير متعامد مع محور دوران الأرض حول نفسها، لذلك فإن المسار المعتمد لقياس اليوم الشمسي هو مسار إهليلجي مشوه (مسقط مسار الأرض على مستوي متعامد مع محور دورانها ومار من وسط الشمس حيث أن الزمن يقاس في المستوي الإستوائي (شكل *2.15*).



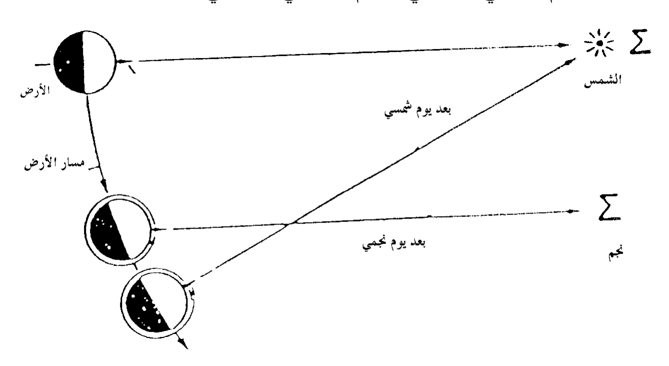
شكل *2.15*: ميلان مستوي ال *ecliptic* عن مستوي الإستواء حيث يقاس الزمن.

وبالتالي فإن هذا القياس غير مناسب لمقياس زمني منتظم، لذلك فقد تم تعويض الشمس بما يدعى الشمس الوسطية *Mean Sun* التي يفترض أنها تتحرك في مستوي الإستواء وبسرعة ثابتة. اليوم الشمسي الوسطي يعرّف عندئذ بفترة مرورين متعاقبين للشمس الوسطية (المفترضة) عبر الزوال المعتبر. الزمن الشمسي الوسطي يقاس بالزاوية الساعية للشمس الوسطية، وفي حال قياسه في غرينويتويتش (الزاوية الساعية للشمس الوسطية في غرينويتش) يدعى الزمن الدولي *Univesal Time UT*. لأغراض عملية، فقد تم إعتبار بداية اليوم هو منتصف الليل حيث:

الزاوية الساعية للشمس الوسطية في غرينويتش *UT=12+*.

يمكن إعتبار الزمن الدولي كشكل خاص من الزمن النجمي. الفرق بطول اليوم في كلا المقياسين يبلغ حوالي الأربع دقائق، وذلك لأن حركة الأرض السنوية في مدارها تبلغ $1^\circ \approx 360^\circ/365$. العلاقة التقريبية (شكل *2.16*):

اليوم النجمي الوسطي=اليوم الشمسي الوسطي - $3^m 55.^s 909$



شكل *2.16*: إختلاف طول اليوم النجمي واليوم الشمسي.

يتأثر الزمن الدولي *UT* المقاس في موقع معين بعوامل ناشئة عن موقع القطب *Pole* اللحظي ومرتبطة بالموقع الجغرافي لمكان القياس. للتمكن من مقارنة قياسات ال *UT* في مختلف أنحاء الكرة الأرضية يتم اللجوء إلى نسب القياسات إلى القطب الأرضي الإتفاقي *Conventional Terrestrial Pole CTP*. هذا يعطي الفرق بالمقدار $\Delta\Lambda_p$. ويدعى هذا الزمن الدولي المصحح من أجل القطب *UT1* وهو يمثل أساس المقياس الزمني في الفلك الجيوديزي وجيوديزيا الأقمار الصناعية، لأنه يحدد التوجيه اللحظي لجملة الإحداثيات الأرضية الإتفاقية *Conventional Terresrial System* في الفضاء، وكذلك يمثل مقياس الزمن الأساسي في الملاحة. يحوي هذا المقياس الزمني *UT1* كل تغيّرات دوران الأرض ولذلك فهو ليس بمقياس زمني منتظم. العلاقة الأساسية بينه وبين الزمن النجمي الوسطي في غرينويتش *GMST* تم تقديمها من قبل الإتحاد الفلكي العالمي *International Astronomical Union IAU* وتم تعيينها منذ *01.01.1984* كالتالي:

$$\text{GMST at } 0^h\text{UT1} = 6^h41^m50.^s5481 + 8640184.^s812866\ T_u + 0.^s093104\ T_u^2 - 6.^s2 \times 10^{-6}\ T_u^3. \quad 2.48$$

حيث T_u الفارق الزمني منذ الزمن النظامي (فقرة *2.1.2*) *J2000 1. January, 12^hUT1* محسوب بالقرن اليولياني ذو ال *365.25* يوماً في السنة.

2.2.3 الزمن الديناميكي *Dynamical Time*

يمكن الحصول على نظام زمني منتظم من نظريات الحركة ومن التقويمات *ephemerides*، أي مواقع أجسام سماوية متعلقة بالزمن في إطارات مرجعية مناسبة. يدعى المقياس الزمني الذي يعتمد على تلك القواعد بالزمن الديناميكي (الحركي)، وهو يمثل الزمن العطالي بشكل مثالي. يمكن تمييز نوعين من الأنظمة الحركية المعتمدة، الأول يدعى الزمن الحركي ذو المركز الكتلي *Barycentric Dynamical Time TDB* وهو مشتق من الحركات المدارية بالنسبة لمركز كتل المجموعة الشمسية، والثاني هو الزمن الحركي الأرضي *Terrestrial Dynamical Time TDT*، ويستند على مركز كتلة الأرض. يستخدم هذا الزمن في جيوديزيا الأقمار الصناعية لأنه مستقل عن نظريات حركة الكواكب ويمكن إضافة لذلك إهمال تأثير مفهوم النسبية العامة *relativity* التي تقول بأن ساعة تتحرك مع الأرض تخضع لتغييرات دورية لغاية *1.6* ميللي ثانية ناشئة عن الحركة السنوية ضمن حقل جاذبية الشمس. يستخدم الزمن الديناميكي في التقويمات الفلكية منذ بداية عام *1984*.

2.2.4 الزمن الذري *Atomic Time*

تم إيجاد مقياس الزمن الذري الدولي العالمي *International Atomic Time Scale TAI* لتحقيق نظام زمني سهل ومنتظم. وكذلك أتّخِذت الواحدة الزمنية له بحيث تكون متساوية مع فترة الثانية التقويمية *ephemeris second* المشتقة من الفترة الوسطية لليوم الشمسي بين عامي *1756* و *1895*. تم تعريف الثانية في نظام الزمن الذري من قبل المؤتمر الثالث عشر للجنة الدولية للأوزان والقياسات في بارس عام *1967*:
الثانية هي الفترة الزمنية المقابلة ل *9 192 631 770* دورا *Periods* للإشعاع المرافق للإنتقال بين المستويين الدقيقين العاليين *Hyperfine* للحالة الأساسية لذرة السيزيوم *Cesium 133*.

وهذا هو أيضا تعريف الثانية في نظام الواحدات الدولي *System International SI*.

يتم حساب الزمن الذري الدولي إعتمادا على قياسات قراءات ساعات ذرية مثبتة على مستوى البحر في مختلف أنحاء الأرض. *TAI* تشكل المتوسطة الموزونة للقياسات المعتبرة. تنشر الفروق الناتجة بينها وبين القياسات الفردية شهريا من قبل المكتب الدولي للأوزان والمقاييس *BIPM*.

من أجل عدة تطبيقات، وخاصة الملاحة، يحتاج المرء إلى مقياس زمني عالي الإنتظام والدقة ومتوافق قدر الإمكان مع النظام الزمني *UT1*، وبالتالي مع دوران الأرض. لذلك فقد تم في عام *1972* تحقيق حل وسط بإنشاء مقياس زمني عالمي يدعى الزمن الدولي المعدل *Coordinated Universal Time UTC*. يختلف زمن ال *UTC* عن الزمن الذري *TAI* بعدد صحيح من الثواني. يعطى هذا العدد الصحيح إما في بداية السنة أو في بداية شهر تموز حيث ان زمن ال *UTC* يتم تحويله إلى *UT1* بواسطة إدراج أو حذف ثانية دورية *Leap Second*.
واحدة الزمن الدولي المعدّل *UTC* هي الثانية في نظام الواحدات الدولي *SI*. الفرق بين الزمنين يدعى *DUT1* ويحقق المتراجحة:

$$UTC - UT1 = DUT1 \leq 0.7s \qquad 2.49$$

ينشر الفرق *DUT1* من قبل الخدمة الدولية لدوران الأرض *IERS*، ويجب أخذه بعين الإعتبار في كل الحسابات المرتبطة بنظام إحداثيات مرجعي مثبّت بالأرض.

إن نظام التوضع العالمي *GPS* يستخدم نظاما زمنيا ذريا خاصا به، واحدته هي أيضا واحدة الزمن الدولي *SI*، ويختلف عن نظام الزمني الدولي المحوّر *UTC* بعدد (تقريباً) صحيح من الثواني. إنطبق نظام زمن ال *GPS* على زمن ال *UTC* بتاريخ بدايته وذلك بتاريخ *5. January 1980*. بإعتبار أن *GPS Time* منتظم ولايخضع للثانية الدورية التي يحتاجها المقياس الدولي المعدّل *UTC* فإن الفرق بين النظامين هو بإزدياد مستمر. العلاقة بين النظامين الزمنيين *UTC* و *GPS* مُضمّنة في المعلومات المبثوثة في إشارة أقمار نظام ال *GPS*. في عام *1995* مثلا بلغ الفرق *10* ثواني.

2.2.5 الساعات ومعايير الترددات *Clocks and Frequncy Standards*

إن جيوديزيا الأقمار الصناعية تتطلب معلومات دقيقة عن الزمن والتردد. في عدة حالات يكون من الضروري ربط زمن بعض الأحداث المرصودة من محطات مختلفة، تبعد عن بعضها مسافات واسعة، وذلك بدقة *±1* ميكروثانية. إن معيار التردد *Frequency Standard* (مولّد الترددات) يجب أن يؤمن ثبوتية *stability* تصل إلى $1x10^{-15}$ على مدى عدة ساعات. هذه الإمكانية العالية يمكن الحصول عليها فقط من الساعات الذرية. أهم مركّبة في الساعة هي نظام توليد التردد *Oscillator*. الشكل *2.16a* يبين مولّد إهتزازات عالي الثباتية من الكوارتز (نموذج *EMXO*) لإنتاج ترددات *10.0 Mhz* و *10.23 Mhz*، ويزن فقط *40 gr* وأبعاده هي *3.5 cm x 3.4 cm x3.4 cm*. الحركة الدورية لهذا النظام يجب أن تُولَّد وتوجّه وتُقرأ بوسائل ملائمة، ففي الساعات الذرية يتم تحويل دورات مولِّد الإهتزاز *Oscillator Cycles* إلى واحدة المقياس (الثانية) بواسطة عدّادات إلكترونية أو مقسّمات.



شكل $2.16a$: مولد ترددات *oscillator* دقيق.

من أجل ساعة مثالية C_I تكون العلاقة بين زمن الدورة T_I *Cycle Period* والتردد الناشئ f_I:

$$T_I = \frac{1}{f_I} \qquad 2.50$$

وبفرض N_I دورة خلال فترة زمنية t-t_0 فإن المقياس الزمني المثالي (المنتظم) يعطينا:

$$\left(t - t_0\right) = N_I . T_I = \frac{N_I}{f_I} \qquad 2.51$$

هنا تساوي قيمة N_I التكامل الآتي:

$$N_I = \int_{t_0}^{t} f_I \, dt = f_I\left(t - t_0\right) \qquad 2.52$$

والذي يمثل عدد الدورات الكلية منذ لحظة البداية t_0.

من أجل ساعة ذرية C_i الموجودة في الواقع العملي فإن التردد ليس ثابتا بشكل كامل. يمكن وصف تصرّف التردد عادة كالتالي:

$$f_i(t) = f_I + \Delta f_i + \dot{f}_i\left(t - t_0\right) + \ddot{f}_i(t) \qquad 2.53$$

الحدود تعني:

Δfi إنحراف ثابت لتردد مولّد التردد C_i.

$\dot{f}_i$ تغير التردد

$\ddot{f}_i$ خطأ تردد عشوائي.

إن حساب الإهتزازات لتلك الساعة الحقيقية C_i يؤدي:

$$N_i = \int_{t_0}^{t} f_i(t)dt = f_I(t - t_0) + \Delta f_i(t - t_0) + \frac{\dot{f}_i(t - t_0)^2}{2} + \int_{t_0}^{t} \tilde{f}_i(t)dt \qquad 2.54$$

والزمن الموافق هو

$$(t_i - t_0) = N_I T_I(t - t_0) + \frac{\Delta f_i}{f_I}(t - t_0) + \frac{\dot{f}_i}{2f_I}(t - t_0)^2 + \int_{t_0}^{t} \frac{\tilde{f}_i(t)}{f_I} dt. \qquad 2.55$$

في حال كون

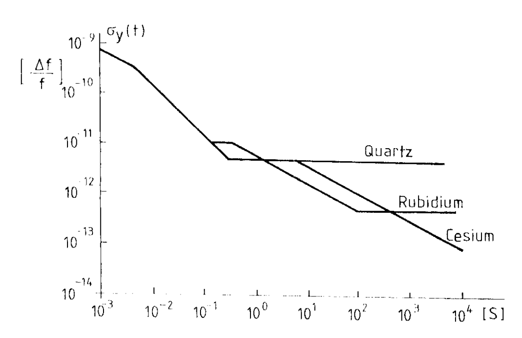
$$\Delta t_i\left(t_0\right) = N_0 T_I \qquad 2.56$$

هو خطأ التزامن لحظة البداية t_0، فنحصل على خطأ توقيت الساعة C_i في زمن t لاحق

$$\Delta t_i(t) = t_i - t = \Delta t_i(t_0) + \frac{\Delta f_i}{f_I}(t - t_0) + \frac{\dot{f}_i}{2f_I}(t - t_0)^2 + \int_{t_0}^{t} \frac{\tilde{f}_i(t)}{f_I} d_i \qquad 2.57$$

يتم تقدير الحدود الثلاثة الأولى في المعادلة. إن خطأ التوقيت يتعلق إذأ بدقة هذا التقدير وبالتكامل. يمكن إجراء هذا التقدير *estimation* بواسطة المقارنة مع ساعات أخرى. لذلك تملك مخابر الزمن ومحطات القياسات الأساسية عدة ساعات ذرية تقارن مع بعضها البعض، أو مع ساعات ذرية متواجدة في محطات أخرى، بإنتظام.

نظرا للدقة العالية المطلوبة في بعض أجزاء جيوديزيا الأقمار الصناعية (في *GPS* مثلا) فإن حالة الساعات الذرية في محطات القياسات الأساسية وفي الأقمار يجب أن تدرس بعناية كبيرة. الشكل *2.17* يبين ثباتية بعض الساعات الذرية (مولدات الإهتزازات *frequency standards*)



شكل *2.17*: ثباتية مولدات الإهتزازات *frequency standards* خلال فترة عدة ساعات.

تستعمل في جيوديزيا الأقمار الصناعية الأنواع التالية من مولدات الإهتزازات *oscillators*:

- مولد الإهتزازات الدقيق من الكوارتز
- معيار الروبيديوم *rubidium standard*
- معيار السيزيوم *cesium standard*
- مولّد الموجات الهيدروجيني *hydrogen maser*.

تعتبر مولدات الإهتزازات من الكوارتز كافية كوحدات توليد الزمن في لواقط الأقمار الصناعية لأنها تعدّل وتصحّح بإستمرار من إشارات الأقمار الصناعية الملتقطة (كما هو الحال في *GPS* و *TRANSIT*). تكون مولدات الإهتزازات تلك حساسة لتغيّرات الحرارة وتميل للتقادم بسرعة (شكل *2.16a*).

من خواص معيار الروبيديوم *rubidium frequncy standard* أنّه يملك ثباتية عالية طويلة الأمد، مثلا بحدود $1x10^{-12}$ خلال *30* يوماً (الشكل الخارجي يشابه الشكل *2.16a*).

تعتبر معايير السيزيوم *cesium frequncy standards* كساعات ذرية ممتازة للغاية بسبب ثباتيتها القصيرة والطويلة الأمد. تستعمل بالمخابر الزمنية *time laboratories* وفي محطات الرصد الأساسية لمراقبة مدارات الأقمار أو في نظام قياس المسافات بالليزر *SLR*. إن قاعدة الزمن في نظام ال *GPS* تحقّق بواسطة ساعات الروبيديوم والسيزيوم.

مولدات الموجات الهيدروجينية تلزم من أجل أعلى متطلبات الدقة (كما هو الحال في *VLBI*) حيث تطلب ثباتية تردد ($\sigma=\Delta f/f$) قدرها 10^{-15} خلال زمن قدره 10^2-10^5 ثانية. تلك الأجهزة حسّاسة وتستعمل حاليا تحت ظروف مخبرية.

2.3 إنتشار الإشارة Signal Progagation

تعبر الإشارة أثناء إنتشارها من القمر الصناعي إلى اللاقط مناطقاً جوية ذات طبيعة وحالة مختلفة وتعاني من تأثيرات مختلفة. يمكن أن تكون التغيّرات في إتجاه وسرعة الإنتشار وبقوة الإشارة. يكون التأثير على نتائج القياسات، في أغلب الأحيان، أكبر من الدقة المطلوبة في جيوديزيا الأقمار الصناعية. نتيجة لذلك يجب تعيين تأثيرات الشروط الجوية *atmospheric effects* بالقياس أو الحساب ويجب إدخالها بعمليات التعديل *adjustment*. من ناحية أخرى، يمكن الحصول على معلومات عن حالة الطبقات الجوية العليا بمقارنة إشارات الأقمار الصناعية الملتقطة مع إشارات تمّ قياسها تحت ظروف خالية من تلك التأثيرات.

2.3.1 تعريفات وعلاقات أساسية *Basic Relations and Definitions*

العلاقة بين طول الموجة λ، التردد f وسرعة الإنتشار v:

$$v=\lambda . f \qquad 2.58$$

حيث تأخذ λ واحدة المتر وتأخذ f واحدة الهيرتز *Hertz* (عدد الإهتزازات بالثانية) وتقاس v بالمتر في الثانية *m/s*.

في طرق القياس في جيوديزيا الأقمار الصناعية تأتي فقط الموجات الإلكترومغناطيسية *electromagnetic waves* بعين الإعتبار. تعتبر الموجة هي إثارة أو إضطراب زمني ومكاني في الحقل الإلكترومغناطيسي. يتردد هذا الإضطراب من أجل موجة دورية بنقطة ثابتة بعد إنقضاء فترة زمنية تدعى الدور *Period P* وبزمن ثابت بعد زيادة مسافة معروفة تدعى طول الموجة λ. العلاقة بين التردد والدور:

$$f= 1/P \qquad 2.59$$

يدعى الجزء t/T من الدور P، الذي خلاله يتقدم الزمن t بالنسبة لمبدأ زمني t_0، بالطور Φ. ولدينا أيضا التردد الزاوي

$$\omega = 2\pi f \qquad 2.60$$

ورقم الموجة أو ثابتة الطور

$$k = 2\pi/\lambda \qquad 2.61$$

وينتج لدينا سرعة الإنتشار

$$v = \lambda.f = \lambda/P = \omega/k \qquad 2.62$$

الموجة التي يمكن التعبير عنها كتابع جيبي للزمن والمكان تدعى موجة جيبية. تكتب إذا الموجات الجيبية الدورية بالشكل:

$$y = A.Sin2\pi\left(\frac{t}{P} + \Phi_0\right) \qquad 2.63$$

حيث y حجم الإضطراب magnitude of disturbances في الزمن t، Φ_0 طور الموجة في الزمن $t=0$، و A حجم الإضطراب الأعظمي (مطال الموجة amplitude). ويكون الطور في الزمن t:

$$\Phi = \frac{t}{P} + \Phi_0 \qquad 2.64$$

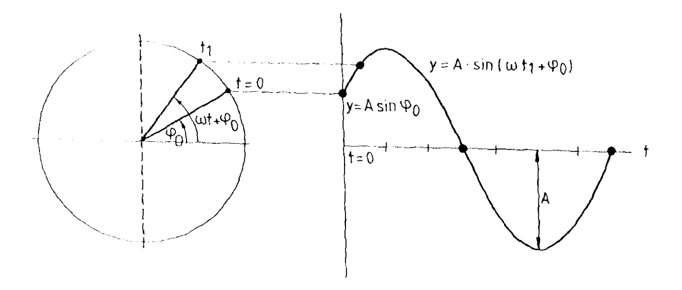
ولدينا زاوية الطور φ:

$$\varphi = 2\pi\Phi \qquad 2.65$$

وبتعويض العلاقة 2.60 بالعلاقة 2.63 نجد

$$Y = A.sin(\omega.t + \varphi_0) \qquad 2.66$$

الشكل 2.18 يبين التفسير الهندسي للمعادلة 2.66.



شكل 2.18: تمثيل إنتشار الموجة الدورية.

بتعويض عدد الدورات N Cycles في المعادلة 2.51 بالطور الكلي المستند على زمن مرجعي t_0 نحصل على العلاقة بين الزمن، الطور والتردد

$$t = \frac{\Phi}{f} \qquad 2.67$$

وهي موافقة للعلاقة 2.59، ويمكن إعتبارها معادلة تعريف ساعة، فهي تعطي العلاقة بين طور موجة دورية وقراءة الساعة الموافقة. تعتبر هذه العلاقة أساسية لإشتقاق معادلة الرصد لقياس الطور في GPS.

تتعلق أطوال موجات وبالتالي سرعة إنتشار الموجات الإلكترومغناطيسية بخصائص الوسط التي تنتشر فيه. سرعة الإنتشار بالفراغ هي

$$c = \frac{\lambda_{vac}}{P} = f.\lambda_{vac} = \frac{\omega}{k_{vac}} \qquad 2.68$$

يتم تبني القيمة العددية لسرعة إنتشار الموجات الإلكترومغناطيسية في الفراغ من قبل الهيئات الدولية. تستعمل حاليا في جيوديزيا الأقمار الصناعية الثابتة التالية:

$$c = 2.99792458.10^8\ ms^{-1} \qquad 2.69$$

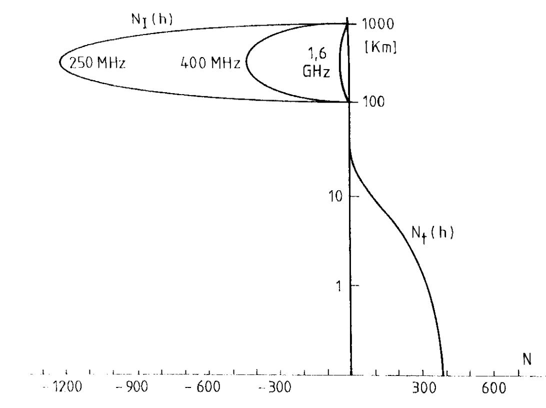
من أجل وسط مختلف عن الفراغ تتغير سرعة الإنتشار بتأثير قرينة الإنكسار:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_{vac}}{\lambda} = \frac{k}{k_{vac}}. \qquad 2.70$$

يفضل، بدلا عن قرينة الإنكسار n (القريبة من الواحد)، إستعمال عامل الإنعكاسية N:

$$N = (n-1).10^6 \qquad 2.71$$

إن تعييناً دقيقاً لقيمة N على طول طريق الإشارة له أهمية جوهرية في جيوديزيا الأقمار الصناعية، لأنه يتم قياس زمن إنتشار الموجات الإلكترومغناطيسية، او فروقات أطوار لموجات مختلفة وتحول بعدها إلى مسافات (بواحدة الأمتار) بإستخدام السرعة المعتمدة. إن هذا العامل يتغير حسب التردد المعتبر. الشكل *2.19* يبين تغيرات حالة N في المعادلة *2.71* بالنسبة للإرتفاع عن سطح الأرض.



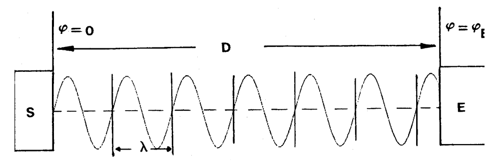
شكل *2.19*: تصرف الإنعكاسية N مع الموجات الدقيقة كتابع للإرتفاع.

2.3.1.1 مبدأ قياس طور الموجة *Phase Measuring*

ليكن S مصدر إرسال إشارة إلكترومغناطيسية دورية (جيبية مثلا) ذات تردد معروف، وهو ثابت في مكانه. في حال وجود لاقط E يقيس زاوية الطور $1 < \varphi_E < 2\pi$ للإشارة الملتقطة، يمكن حساب المسافة بين المرسل واللاقط حسب العلاقة

$$D = N.\lambda + \frac{\varphi_E}{2\pi} \qquad 2.72$$

حيث λ طول الموجة المرسلة، و N عدد صحيح مجهول. وهذا هو مبدأ قياس المسافات بطريقة قياس الطور (شكل *2.20*).



شكل *2.20*: مبدأ قياس المسافات بالطرق الإلكترونية.

في حال كون المرسل في حالة حركة (قمر صناعي مثلا) فإن العلاقة *2.72* ليست صحيحة لأن الإشارة المرسلة تخضع لتأثير دوبلر *doppler effect* (فقرة *1.4.3*) يتغير بذلك طول الموجة بإستمرار (يغيرتأثير دوبلر الفترة الزمنية بين حالتي الطور المتعاقبتين). وهذا يعني ان طور موجة مستقل عن حركة المرسل، إنما طول الموجة يتأثر بها.

2.3.2 التبعثر، سرعة الطور وسرعة الحزمة *Dispersion, Phase Velocity and Group Velocity*

إن وسطا يتعلق إنتشار الموجات فيه بالتردد يدعى وسطا مشتّتا أو مبعثرا. تتعلق إنعكاسية هذا الوسط N بالتردد أو طول الموجة (شكل *2.19*). ينشأ تأثير التبعثر عن تأثيرات إلكترومغناطيسية *dispersion effects* بين الحقل المشحون كهربائيا لهذا الوسط والحقل الخارجي للموجة المتغلغلة فيه. في وسط كهذا يتم قياس سرعات إنتشار مختلفة. التعبير التالي

$$\frac{dv}{d\lambda} \qquad 2.73$$

يدعى تبعثر السرعة *velocity dispersion*. يمكن في وسط مبعثر رصد سرع إنتشار مختلفة للموجات الجيبية.

يمكن تمييز نوعين:

– سرعة إنتشار طور موجة ذات طول موجة محدد ووحيد *Phase velocity* v_p

–سرعة إنتشار حزمة من الموجات ناتجة عن تراكب موجات بترددات مختلفة *Group Velocity* v_g، وتوصف العلاقة بينهما كما يلي:

$$v_g = v_p - \lambda \frac{dv_p}{d\lambda} \qquad 2.74$$

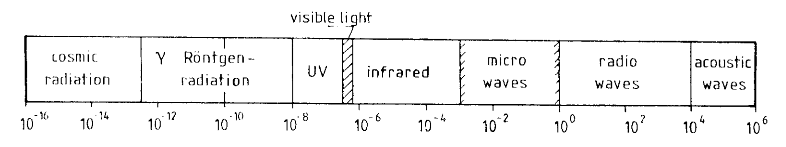
وتكون قرائن الإنكسار الموافقة

$$n_g = n_p + f\frac{dn_p}{df} \qquad 2.75$$

سرعة الزمرة تجسّد السرعة التي تنتشر بها طاقة *energy* أو معلومة *information*. تعتبرتلك الإشارة تركيبا لعدة موجات دورية بترددات مختلفة وتعاني من تبعثرات مختلفة. ففي جيوديزيا الأقمار الصناعية يجب تمييز القياس المستعمل لمعرفة أي نوع من السرع يجب أخذها بعين الإعتبار (طور أو شيفرة). في نظام ال *GPS* مثلا تنتشر الشيفرة بسرعة إنتشار الزمرة v_g بينما ينتشر طور الموجة الحاملة بسرعة الطور v_p. إن طبقة الإيونوسفير *ionosphere* (وهي طبقة الغلاف الجوي *atmosphere* العالية التي يتراوح إرتفاعها عن سطح الأرض *50-1000 km* وتحوي طبقات مشردة مختلفة الخواص) تعتبر وسطا مبعثرا، بينما طبقة التروبوسفير *troposphere* (وهي طبقة الغلاف الجوي *atmosphere* الدنيا والتي تمتدّ من سطح الأرض حتى إرتفاع حوالي *40 km* ويتأثر فيها إنتشار الموجات فقط وفق محتوى بخار الماء ودرجة الحرارة فيها) تعتبر غير مبعثرة (شكل *2.19*)، وتكون فيها $v_g=v_p$.

2.3.3 مجالات التردد *frequency domains*

إن تردد طيف الموجات الإلكترومغناطيسية تحوي حوالي *20* مجالا (شكل *2.22*) يستخدم منهم إثنين فقط في جيوديزيا الأقمار الصناعية وهما مجال الضوء المرئي $0.4\text{-}0.8\ x10^{15}\ Hz$ ومجال الموجات الدقيقة $10^7\text{-}10^{10}\ Hz$ *(microwaves)*.



شكل *2.22*: طيف الموجات الإلكترومغناطيسية.

تستعمل بعض التعابير والرموز المبيّنة في الجدول *2.2* لوصف الترددات.

pico	p	10^{-12}
nano	n	10^{-9}
micro	μ	10^{-6}
milli	m	10^{-3}
centi	c	10^{-2}
Hecto	H	10^{2}
Kilo	K	10^{3}
Mega	M	10^{6}
Giga	G	10^{9}
Tera	T	10^{12}
Peta	P	10^{15}

جدول *2.2*: رموز وتعابير وترتيب حجم الترددات الشائعة.

الجدول *2.3* يبين أنواع، توزيعات وتعابير مستعملة في الموجات الإلكترومغناطيسية. في تقنية المعلومات تستخدم حزم الترددات *frequency bands*.

wavelength λ	frequency f	
LF	>1000 m	<300 KHz
MF	100...1000 m	300...3000 KHz
HF	10...100 m	3...30 MHz
VHF	1...10 m	30...300 MHz
UHF	10 cm...1 m	300...3000 MHz
SHF	1 cm...10 cm	3 GHz...30 GHz
EHF	1 mm...1 cm	30...300 GHz

جدول *2.3*: حزم الترددات.

تستخدم في جيوديزيا الأقمار الصناعية أيضا تسميات حزم الرادار *radar bands* المختلفة (جدول *2.4*) حيث تعود الأحرف الكبيرة المميّزة لكلّ حزمة إلى تسميات عشوائية نشأت أثناء الحرب العالمية الثانية. في نظام ال *GPS* مثلا تستخدم الحزمة *L*.

denomination	frequency	mean wavelength
P-band	220...300 MHz	115 cm
L-band	1...2 GHz	20 cm
S-band	2...4 GHz	10 cm
C-band	4...8 GHz	5 cm
X-band	8...12.5 GHz	3 cm
Ku-band	12.5...18 GHz	2 cm
K-band	18...26.5 GHz	1.35 cm
Ka-band	26.5...40 GHz	1 cm

جدول *2.4*: حزم الرادار.

أخذنا في هذا الفصل نظرة عامة عن جمل الإحداثيات، وتعرّفنا فيه على أنظمة الإحداثيات الديكارتية والعطالية المستخدمة في جيوديزيا الأقمار الصناعية، ورأينا الدور الجوهري للأنظمة والتصحيحات الزمنية فيها. وبعد أن أخذنا فكرة عن الموجات الإلكترومغناطيسية وإنتشارها، نقوم في الفصل القادم بتقديم وصفا للحركة المدارية للقمر الصناعي والعوامل المؤثرة على القمر في مساره.

3 حركة القمر الصناعي في مداره *Satellite Orbit Motion*

تتطلب كلّ مهام وأغراض جيوديزيا الأقمار الصناعية تقريبا معرفة مواقع الأقمار الصناعية المترتبطة بمعلومات زمنية دقيقة في إطار مرجعي مناسب. إن حساب مدارات الأقمار والتنبؤ بها، وكذلك إيجاد طرقا ملائمة للقياسات والتعديل يعتبر مطلبا أساسيا لحساب كل العناصر التالية:

– الإحداثيات الجيومركزية لمحطات الرصد
– وساڤط لوصف حقل الجاذبية الأرضية وكذلك لتعيين جيوئيد دقيق
– وساڤط توجه الأرض في الفضاء.

تتعلق دقة الحساب النهائية بالدقة المتوفرة لمدارات الأقمار، تصحّ هذه المقولة بشكل كامل ومتزايد في مجال الجيوديزيا التطبيقية كتعيين إحداثيات نسبية في نظام ال *GPS*، للحصول على دقة نسبية في الإحداثيات مقدارها *1 cm* يتوجب معرفة مدارات الأقمار الصناعية بدقة عدة أمتار (فقرة *4.14.3*).

على مستخدمي طرق جيوديزيا الأقمار الصناعية، الملاحة والمجالات المشابهة الأخرى الإلمام بالمعرفة الأساسية لحركة الأقمار في مداراتها والإعاقات الرئيسية التي تخضع لها بهدف إتخاذ الإجراءات الملائمة لتعيين المسارات. في هذا الفصل سوف يتم شرح المعلومات الأساسية مبتدئين بحركة كيبلر *Kepler* النظرية (حركة القمر الصناعي غير المعاقة) في حقل قوى مركزي ومن ثم نذكر بإختصار الإعاقات الرئيسية وتأثيرها على مدارات الأقمار الصناعية.

3.1 أساسيات في الميكانيك السماوي *Fundamentals of Celestial Mechanics*

نهتم في الميكانيك السماوي بحركة الأجسام السماوية تحت تأثير جذب كتل متبادل. أبسط شكل لهذا الجذب هي مسألة جسمين *two body problem*. من أجل الأقمار الصناعية يمكن إهمال كتلة القمر بالنسبة إلى كتلة الجسم المركزي (الأرض). يمكننا وصف مسألة الجسمين كما يلي:

بمعرفة موقعي وسرعتي جسمين معروفي الكتلة في زمن ما يتحركان تحت تأثير قوى جذبهما المتبادلة، يمكن حساب موقعهما وسرعتهما في أي زمن.

بإفتراض أن الأجسام متجانسة وتولّد حقل جاذبية لنقطة كتلية فيمكن وصف الحركة المدارية في مسألة جسمين تجريبيا بواسطة قوانين كيبلر وكذلك بواسطة ميكانيك نيوتن.

إن مسألة الجسمين هي من المسائل القليلة في الميكانيك السماوي التي لها حل كامل. مسألة الثلاث أجسام أو عدة أجسام ليس لها حل عام. يعالج الميكانيك السماوي مسألة إعاقة المدارات وحساب التقويمات.

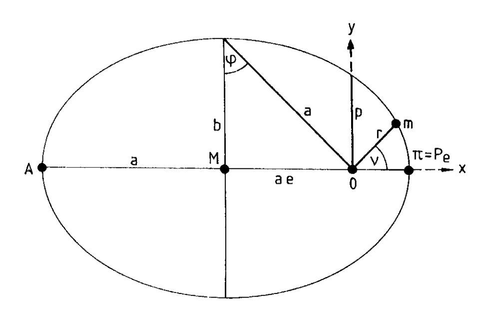
يعود الميكانيك السماوي الحديث إلى عام *1687* بإصدار العالم إسحق نيوتن كتابه *Principia*، تمّ فيه وصف قوانين الجاذبية والحركة للمرة الأولى. في الثلاثة مئة سنة التالية لم يتم تطور جذري في الميكانيك السماوي، ولكن إطلاق أول قمر صناعي وتطوير الحاسبات الكبيرة مكّن من إعطاء دفعة لأفكار جديدة. بعد أن كانت القياسات تقتصر على الإتجاهات يمكن حديثا قياس المسافات وتغيراتها. إضافة إلى إعاقة الشمس المعروفة وإعاقة القمر والكواكب الأخرى لحركة الأقمار، يجب أن تعالج أيضا تأثيرات حقل الجاذبية المتغير والقوى الأخرى المستقلة عن الجاذبية. من خلال تطوير حواسب سريعة فإنه يمكن معالجة كمية معطيات كبيرة وإستعمال طرق تكامل عددية.

3.1.1 حركة كيبلر *Keplerian Motion*

شكّل العالم يوهان كيبلر *Johannes Kepler 1571-1630* قوانينه الثلاثة المتعلقة بحركة الكواكب تجريبيا معتمدا على قياسات الفلكي *Tycho Brahe 1546-1601* التي أجراها في الدانمارك. القوانين الثلاثة تعطي وصفا وليس تفسيرا لحركة الكواكب. هذه القوانين تتضمن تقريبات كبيرة للحركات الحقيقية داخل المجموعة الشمسية لأن كتل الكواكب يمكن إهمالها بالمقارنة مع كتلة الشمس ولأنه يمكن إعتبار الشمس كنقطة كتلية بإعتبار أن المسافات شاسعة بين الأجسام وبينها. لذلك تدعى الحركة الثقالية الغير معاقة بحركة كيبلر.

القانون الأول: إن مسار كل كوكب هو إهليلج تقع الشمس في أحد محرقيه.

الشكل الهندسي للمدار معرف في هذا القانون، الشكل *3.1* يبين الرموز الإعتيادية.



شكل 3.1: الشكل الهندسي للمدار الإهليلجي.

يدعى المحور الرئيسي $A\pi$ خط التكوّر *Line of Apside*.

في حال إعتبار أن النقطة 0 هي مركز المجموعة الشمسية تدعى إذا النقطة A الأبعد عن النقطة المركزية ب *Apocenter* والنقطة π الأقرب *Pericenter*.

في حال إعتبار أن النقطة 0 هي مركز كتلة الشمس تدعى النقطة *Aphelion A* والنقطة *Perihelion* π.

في حال إعتبار أن النقطة 0 هي مركز كتلة الأرض فتدعى النقطة A عندئذ *Apogee* والنقطة π تدعى *Perigee*. الزاوية ν تدعى دوما الإنحراف الحقيقي. تفترض حركة كيبلر مستويا للحركة. يمكن إعتماد مستوي المدار هذا لتعريف جملة إحداثيات بحيث تشكل النقطة 0 نقطة المبدأ. يمكن تعيين موقع نقطة كتلية m عندئذ بإحداثياتها القطبية في المستوي (r, ν). بفرض 0π أحد محاور الإحداثيات المدارية وبإعتبار:

r بعد النقطة ذات الكتلة m عن مركز الكتلة الرئيسية،

ν الإنحراف الحقيقي،

a نصف طول المحور الكبير، e اللامركزية العددية، p وسيط متعلق بالإهليلج، نجد عندها معادلة المنحني الإهليلجي:

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \nu}$$

وهذه العلاقة تعطي الشكل الرياضي لقانون كيبلر الأول.

قبل تقديم القانون الثاني يمكن عرض بعض العلاقات المبسطة الممكن إشتقاقها من الشكل الهندسي:

$$p = \frac{b^2}{a}; \quad e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}; \quad a = \frac{p}{1 - e^2}; \quad b = \frac{p}{\sqrt{1 - e^2}}. \qquad 3.1$$

حيث $a.e$ اللامركزية الخطية والتي تساوي البعد بين نقاط المحارق ومركز المدار.

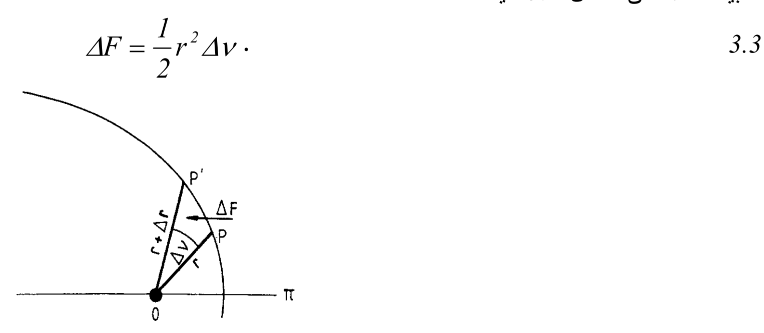
من أجل $e=0$ فإن $a=b=p$ ويتحول الإهليلج إلى دائرة. يمكن إستعمال الزاوية اللامركزية φ عوضا عن e، عندها تتحقق العلاقات:

$$e = \sin \varphi \qquad \sqrt{1 - e^2} = \cos \varphi$$
$$p = a \cos^2 \varphi \qquad b = a \cos \varphi = p \sec \varphi. \qquad 3.2$$

القانون الثاني: الخط الواصل من الشمس إلى أي كوكب يمسح مساحات متساوية من الفضاء خلال أزمنة متساوية.

ويدعى أيضا قانون المساحات، ويصف سرعة الكوكب في مداره. إعتمادا على هذا القانون يمكن تعيين موقع كوكب كتابع للزمن بإحداثيات قطبية r، ν. من الشكل 3.2 لدينا

$$\Delta F = \frac{1}{2} r^2 \Delta \nu \cdot \qquad 3.3$$



شكل 3.2: حركة القمر حسب قانون كيبلر الثاني.

العلاقة 3.3 صالحة تقريبا من أجل مثلث متناهي بالصغر O, P, P'. وحسب القانون الثاني تتناسب المنطقة الممسوحة ΔF بواسطة الشعاع r مع الفترة الزمنية المرافقة Δt،

$$r^{2}\Delta\nu = c.\Delta t \qquad 3.4$$

حيث c ثابتة. وتكتب العلاقة بشكل تفاضلي

$$r^{2}\frac{d\nu}{dt} = c. \qquad 3.5$$

العلاقة *3.5* تعبّر عن قانون كيبلر الثاني بشكل رياضي.

يمكن كتابة علاقات إضافية، بإدراج إحداثيات عمودية x, y. من الشكل *3.1* نجد

$$\begin{aligned} x &= r.\cos\nu \\ y &= r.\sin\nu \\ r &= \sqrt{x^{2}+y^{2}} \end{aligned} \qquad 3.6$$

وكذلك

$$\tan\nu = \frac{y}{x}. \qquad 3.7$$

بإشتقاق العلاقة *3.7* بالنسبة للزمن نحصل على

$$\frac{\dot{\nu}}{\cos^{2}\nu} = \frac{x\dot{y} - y\dot{x}}{x^{2}}. \qquad 3.8$$

بتعويض *3.6* بالعلاقة *3.8* و إدخال *3.8* بالعلاقة *3.5* نجد معادلة تصف قانون كيبلر الثاني بواسطة إحداثيات عمودية

$$x\dot{y} - y\dot{x} = c. \qquad 3.9$$

تدعى الثابتة c بثابتة المساحة.

القانون الثالث: إن مكعبّ أنصاف المحور الكبير لمدارات الكواكب متناسب مع مربع طور دوراناتها.

يعني ذلك بشكل رياضي أنه من أجل كوكب P_i ذو طور دوران U_i، حركة نسبية

$$n_{i} = \frac{2\pi}{U_{i}} \qquad 3.10$$

ونصف قطر محور كبير a_i:

$$\frac{a_{i}^{3}}{U_{i}^{2}} = \frac{C^{2}}{4\pi^{2}} \qquad 3.11$$

حيث C هي ثابتة من أجل المجوعة الكوكبية. بإدماج العلاقتية *3.10* و *3.11* يكتب التعبير المستخدم عادة:

$$a_{\mathring{a}}^{3}.n_{\mathring{a}}^{2} = C^{2}. \qquad 3.12$$

توصل كيبلر لهذا القانون بشكل تجريبي لأنه يصف حركة الكواكب الكبيرة بشكل تقريبي. ولكن تم الحصول على قيمة عددية مختلفة كليا من أجل أقمار كوكب المشتري *Jupiter*. لذلك تستخدم العلاقة

$$\frac{a^{3}}{U^{2}} = \frac{k^{2}}{4\pi^{2}}\left(M + m\right) \qquad 3.13$$

حيث k ثابتة عامة و M و m هما الكتل المعتبرة. يمكن تعيين كتل الأجسام السماوية بإستعمال العلاقة *3.13*.

تصف قوانين كيبلر أبسط شكل لحركة الأجسام السماوية بفرض أنه لاتوجد هناك قوى خارجية مؤثرة، وأن الكتل المعتبرة يمكن إعتبارها كنقاط كتلية أو إعتبار أجسام متجانسة ذات توزع كتلي كروي. من أجل حركة قمر صناعي حول الأرض تصحّ تلك الفرضيات فقط كتقريب أولي. تشكل مدارات كيبلر مدارا مرجعيا مبسطا وتعطي معلومات نوعية عن شكل الحركة. كان كيبلر يعتقد بإن تلك الحركات تتبع قوانين عامة. تلك القوانين العامة تم إيجادها من قبل إسحاق نيوتن *1643-1727* تحت إسم قانون الجاذبية.

3.1.2 ميكانيك نيوتن ومسألة جسمين *Newton Mechanics and Two Body- Problem*

3.1.2.1 معادلة الحركة *Equation of Motion*

في الكتاب الأول (المبادئ *prancipia*) قدم نيوتن قوانين الحركة الثلاثة:

1- كل جسم يبقى، في حالة سكونه أو حالة حركته حركة منتظمة بخط مستقيم، على حالته مالم يجبر على تغيير حالته بتأثير قوة خارجية.

2- درجة تغير كمية التحرك (التسارع) *momentum* للجسم تتناسب مع القوة المؤثرة وهو بنفس إتجاه تأثير الحركة.

3- لكل فعل هناك رد فعل يساويه ويعاكسه بالإتجاه.

يعبّر عن القانون الثاني بالعلاقة

$$K = m\ddot{r} \quad 3.14$$

حيث K هو المجموع الشعاعي لكل القوى المؤثرة على الكتلة m و $\ddot{r}$ شعاع التسارع للكتلة، مقاس في إطار مرجعي عطالي. إضافة لذلك فقد وصف نيوتن قانون الجاذبية العامة عام 1687 كما يلي:

$$K = -G\frac{Mm}{r^2}. \quad 3.15$$

حيث G ثابتة الجاذبية العامة:

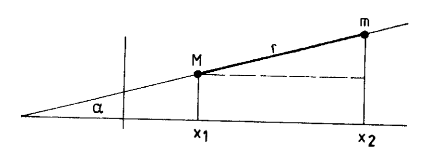
$$G=6.673.10^{-11}\, m^3kg^{-1}s^{-2}. \quad 3.16$$

في نظام إحداثيات ديكارتي بمحاور x, y, z وبزوايا α, β, γ بين إتجاهات القوة ومحاور الجملة فنجد من العلاقة 3.14 من حركة M بالنسبة إلى m موصوفة بالمركبات (شكل 3.3):

$$M\ddot{x}_1 \approx K_x \approx K\cos\alpha \quad 3.16$$

وبتعويض 3.15 نجد

$$M\ddot{x}_1 = -G\frac{Mm}{r^2}\cos\alpha = -G\frac{Mm}{r^3}(x_1 - x_2).$$



شكل 3.3: مركبات ضمن معادلة الحركة لنيوتن.

بعد إعادة ترتيب المعادلة نجد من أجل المركبات الثلاثة:

$$M\ddot{x}_1 = G\frac{Mm}{r^3}(x_2 - x_1)$$
$$M\ddot{y}_1 = G\frac{Mm}{r^3}(y_2 - y_1)$$
$$M\ddot{z}_1 = G\frac{Mm}{r^3}(z_2 - z_1). \quad 3.17$$

من حركة m بالنسبة إلى M نجد:

$$m\ddot{x}_2 = -G\frac{Mm}{r^3}(x_2 - x_1)$$
$$m\ddot{y}_2 = -G\frac{Mm}{r^3}(y_2 - y_1)$$
$$m\ddot{z}_2 = -G\frac{Mm}{r^3}(z_2 - z_1). \quad 3.18$$

بنقل مبدأ مجموعة الإحداثيات إلى مركز الكتلة M بإستعمال التعويض $x_2-x_1=x$، $y_2-y_1=y$، $z_2-z_1=z$، وبتقسيم العلاقات 3.17 على M والعلاقات 3.18 على m وثم طرح المجموعتين 3.17 و 3.18 من بعضهما:

$$\ddot{x} = -G(M+m)\frac{x}{r^3}$$
$$\ddot{y} = -G(M+m)\frac{y}{r^3}$$
$$\ddot{z} = -G(M+m)\frac{z}{r^3} \quad 3.19$$

حيث $r^2=x^2+y^2+z^2$

وبشكل شعاعي يكون

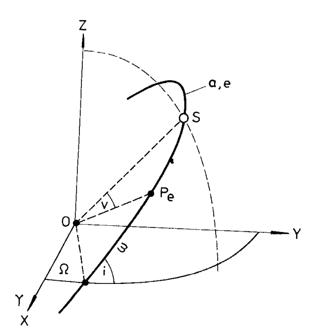
$$\ddot{\mathbf{r}} = \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = -G\frac{M+m}{r^3}\mathbf{r}. \quad 3.20$$

من أجل قمر صناعي يمكن إهمال الكتلة *m*. تصبح المعادلة الأساسية لحركة القمر بالشكل التالي:

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{GM}{r^3}\mathbf{r}.$$

3.21

حيث *r* هو شعاع الموقع الجيومركزي للقمر الصناعي. إن العلاقة *3.21* هي الشكل الشعاعي لعلاقة تفاضلية من المرتبة الثانية ذات ستة ثوابت تكاملات. هذا يعني أن حركة جسم سماوي حول جسم مركزي، مسببة بالجذب المتبادل، لها *6* وسائط مستقلة. تستعمل عادة عناصر مدار كيبلر الستة كما في الشكل *3.4*. حيث يمثل *a* نصف طول المحور الكبير، *e* اللامركزية العددية، *i* زاوية ميلان *inclination* المدار، *Ω* زاوية الصعود المستقيم *right ascension* للعقدة الصاعدة، *ω* مضمون ال *argument of perigee* (أقرب نقطة إلى الجسم المركزي) و *ν* زاوية الإنحراف الحقيقي *true anomaly*.



شكل *3.4*: عناصر كيبلر المدارية.

تم إشتقاق المعادلة *3.21* بإعتبار تأثير قوى الجاذبية فقط، إهمال كتلة القمر الصناعي، وكتلة الجسم المركزي مركزة بنقطة. وهذا، في الواقع العملي، غير صحيح لأن عدم تجانس تركيب الأرض الحقيقية يؤثر على حركة الأقمار القريبة منها. بناء على ذلك يمكن إعتبار مدار كيبلر كتقريب أولي للمدارات الحقيقية للأقمار. سوف نتعرض لمناقشة تأثير العوامل المؤثرة الأخرى في الفقرة *3.2*.

إن تكاملات العلاقة *3.21* توصلنا إلى معطيات هامة، من بينها إمكانية إشتقاق قوانين كيبلر لحركة الأقمار الصناعية من قانون نيوتن في الجاذبية والحركة.

التكاملات:

بجداء المعادلات *3.19* ب *x, y, z* على الترتيب وتشكيل أزواج من التفاضلات نجد

$$x\ddot{y} - y\ddot{x} = 0$$
$$y\ddot{z} - z\ddot{y} = 0$$
$$z\ddot{x} - x\ddot{z} = 0.$$

3.22

وبالتكامل يكون

$$x\dot{y} - y\dot{x} = C_1$$
$$y\dot{z} - z\dot{y} = C_2$$
$$z\dot{x} - x\dot{z} = C_3$$

3.23

حيث C_1, C_2, C_3 ثوابت. بجداء المعادلات الواحدة بعد الأخرى ب *z, x, y* وتشكيل المجموع الكلي يحذف القسم اليساري من المعادلات ويكون

$$C_1z+C_2x+C_3y=0. \qquad 3.24$$

وهذه معادلة مستوي يحتوي على مركز جملة الإحداثيات. ويمكن القول أن القمر الصناعي يدور في مستوي يحوي على مركز الجسم المركزي. يمكن تحديد توجه هذا المستوي بواسطة وسيطين، مثلا *i* و *Ω* كما في الشكل *3.4*. العلاقة بين الوسيطين *i* و *Ω* وبين الثوابت تكون عندها

$$\frac{C_1}{N} = \sin\ \Omega\ \sin\ i$$
$$\frac{C_2}{N} = -\cos\ \Omega\ \sin\ i$$
$$\frac{C_3}{N} = \cos\ i$$

3.25

حيث $N = \sqrt{C_1^2 + C_2^2 + C_3^2}$ هو ناظم مستوي المدار.

بإعتبار ان الحركة موجودة على مستوي فيمكن إدراج جملة إحداثيات مستوية عمودية ξ، η ذات مبدأ يقع في مركز كتلة الجسم المركزي (شكل *3.5*). تكون معادلات الحركة الموافقة للعلاقة *3.21* حسب مركباتها كما يلي:

$$\ddot{\xi} = -GM\frac{\xi}{r^3}; \qquad \ddot{\eta} = -GM\frac{\eta}{r^3} \tag{3.26}$$

حيث $r2=\xi^2+\eta^2$.

والعلاقة الموافقة للعلاقة *3.22* تكون

$$\xi\ddot{\eta} - \eta\ddot{\xi} = 0 \tag{3.27}$$

والتي تصبح بعد التكامل

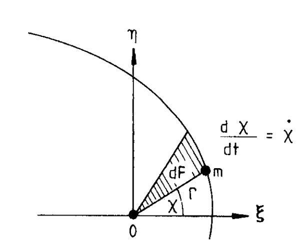
$$\xi\dot{\eta} - \eta\dot{\xi} = p_1. \tag{3.28}$$

بتعويض العلاقة *3.28* بإحداثيات قطبية

$$\xi = r\cos\chi \qquad \eta = r\sin\chi \tag{3.29}$$

تعطي

$$r^2\dot{\chi} = p_1. \tag{3.30}$$



شكل *3.5*: توضيح قانون المساحات.

بإعتبار مساحة متناهية في الصغر dF، ممسوحة بواسطة الشعاع r خلال الزمن المتناهي بالصغر dt (شكل *3.5*) نجد من أجل مساحة المثلث المتناهي في الصغر

$$dF = \frac{1}{2}r^2\dot{\chi}dt$$

ومنه

$$\frac{dF}{dt} = \frac{1}{2}r^2\dot{\chi} = \frac{1}{2}p_1 \tag{3.31}$$

لذلك

$$F = \frac{1}{2}p_1 t + p_2. \tag{3.32}$$

العلاقتين *3.31* و *3.32* تحتويان على قانون كيبلر الثاني، حيث يمكن القول:

- تجري الحركة في مستوي
- الحركة تتبع قانون المساحات.

يتبقى إشتقاق برهان حول شكل المدار. بجداء العلاقة *3.26* بالحدود $2\dot{\eta},\ 2\dot{\zeta}$ على الترتيب

$$\ddot{\xi}2\dot{\xi} = -GM\frac{\xi}{r^3}2\dot{\xi}$$
$$\ddot{\eta}2\dot{\eta} = -GM\frac{\eta}{r^3}2\dot{\eta} \tag{3.33}$$

وبالجمع ينتج

$$\frac{d}{dt}(\dot{\xi}^2 + \dot{\eta}^2) = -\frac{2GM}{r^3}(\xi\dot{\xi} + \eta\dot{\eta}). \tag{3.34}$$

حيث $r^2 = \zeta^2 + \eta^2$

$$2r\dot{r} = 2\xi\dot{\xi} + 2\eta\dot{\eta}$$

ويتبع

$$\frac{d}{dt}(\dot{\xi}^2 + \dot{\eta}^2) = -\frac{2GM}{r^3}\dot{r} = 2GM(\dot{\frac{1}{r}}) \quad 3.35$$

وتصبح بعد التكامل

$$\dot{\xi}^2 + \dot{\eta}^2 = 2\frac{GM}{r} + p_3. \quad 3.36$$

نحصل بدلالة الإحداثيات القطبية وبعد التفاضل على

$$\dot{r}^2 + r^2\dot{\chi}^2 = \frac{2GM}{r} + p_3. \quad 3.37$$

إحدى حلول تلك المعادلة التفاضلية هي

$$r = \frac{p}{1 + e\cos(\chi - \overline{\omega})} \quad 3.38$$

حيث $\overline{\omega}, p, e,$ ثوابت. تشكل العلاقة *3.38* الشكل القطبي لمقطع مخروطي. من أجل $\chi = \overline{\omega}$ تصبح مسافة القمر r أصغرية، وهذا يعني أن القمر يمر من نقطة الحضيض *perigee* (فقرة *3.1.1* وشكل *3.1*). بإعتبار أن المسافة الزاوية لقمر من نقطة الحضيض تدعى الإنحراف الحقيقي ν فإن العلاقة

$\chi - \overline{\omega} = \nu$ تكون صحيحة. في حال $\nu = 90°$ يكون $r=p$. ونعرف من العلاقات *3.2* أن $p = a\,(1-e^2)$.

يمكن الآن وصف ثوابت التكامل هندسيا وتصبح العلاقة *3.38*

$$r = \frac{p}{1 + e\cos\nu}. \quad 3.39$$

في حال قياس مضمون الإرتفاع *argument of latitude* $u=\omega+\nu$ من العقدة الصاعدة *ascending node* لمدار القمر، يمكن عندها تثبيت مبدأ قياس الزوايا. يمكن كتابة العلاقة *3.39* بشكل آخر أيضا

$$r = \frac{p}{1 + e\cos(u - \omega)}, \quad 3.40$$

حيث يعرّف ω بأنه مضمون نقطة الحضيض *argument of perigee* (شكل *3.4*). حتى الآن فقد تعاملنا بخمس عناصر من أصل عناصر التكامل الستة المذكورة وهي

$$\Omega, i, \omega, e, a.$$

الثابت الأخير هو الكمية p_2 في العلاقة *3.32*، قانون كيبلر للمساحات، الذي يعين موقع القمر المتعلق بالزمن في مداره. تستعمل عدة وسائط متكافئة من بينها زمن عبور t_0 نقطة الحضيض *perigee* أو الإنحراف الحقيقي ν. يمكن كتابة العلاقات التالية بين عناصر مدار كيبلر وبين ثوابت التكاملات

$$p = \frac{p_1^2}{GM}, \quad e^2 = 1 + \frac{p_1^2 p_3}{G^2M^2}, \quad p_1 = \sqrt{GMp}, \quad p_3 = \frac{-GM}{a}. \quad 3.41$$

يمكن تشكيل قانون كيبلر الثالث من العلاقتين *3.32* و *3.41*. إن فترة دوران قمر صناعي هي $T = t_2 - t_1$ ونحصل بذلك على مساحة مقطوعة بعد دورة كاملة

$$F_2 - F_1 = \frac{1}{2}p_1(t_2 - t_1) = \pi ab \quad 3.42$$

وهذا يعني مساحة إهليلج. ومن العلاقات التالية

$$p_1 = \sqrt{GMp}, \quad b^2 = a^2(1 - e^2), \quad p = a(1 - e^2)$$

نحصل بعد إعادة بعض الترتيبات على

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{GM}} a^{\frac{3}{2}} \quad 3.43$$

والحركة الزاوية الوسطية

$$n = \frac{2\pi}{T} \qquad 3.44$$

ينتج التعبير الرياضي لقانون كيبلر الثالث

$$a^3 n^2 = GM \qquad 3.45$$

وبذلك تم إشتقاق قوانين كيبلر الثلاثة بإعتماد علاقات نيوتن الأساسية *3.14*، *3.15*. بإستخدام المعادلة *3.36* وتعويض *3.41* يمكن الحصول على علاقة هامة أخرى من أجل p_3 تعطي سرعة القمر الصناعي في مداره

$$v^2 = \dot{\xi}^2 + \dot{\eta}^2 = 2\frac{GM}{r} - \frac{GM}{a}$$

$$v^2 = GM(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}). \qquad 3.46$$

العلاقة *3.37* مع تعويض $\dot{\chi} = \dot{v}$ تعطي العلاقة التالية بالإحداثيات القطبية

$$v^2 = \dot{r}^2 + r^2\dot{v}^2 = GM(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}). \qquad 3.47$$

تبين المعادلة أن سرعة جسم سماوي تتعلق بالمسافة r ونصف القطر الكبير a وليس باللامركزية وبالتالي ليس بشكل المدار.

إضافة لذلك بإعتبار المعادلة *3.30* وتبديل *3.41* و *3.1* من أجل p_1 نصل إلى شكل آخر لقانون كيبلر الثاني

$$r^2\dot{v} = \sqrt{GMa(1-e^2)}. \qquad 3.48$$

بتعويض قيمة $\dot{v}$ من *3.48* في *3.47* نحصل على

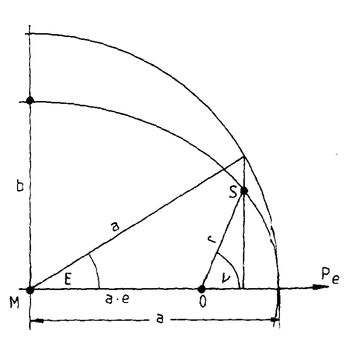
$$\dot{r}^2 + r^2\frac{GMa(1-e^2)}{r^4} = GM(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}). \qquad 3.49$$

بتعويض *3.45* بالعلاقة *3.49* نحصل على

$$ndt = \frac{r}{a}\frac{dr}{\sqrt{a^2e^2 - (r-a)^2}}. \qquad 3.50$$

لدينا من الشكل *3.6* العلاقة

$$r = a(1 - e\cos E) \qquad 3.51$$



شكل *3.6*: العلاقة بين الإنحراف الحقيقي v واللامركزي E.

تعوّض العلاقة *3.51* بالعلاقة *3.50* فينتج

$$ndt = (1 - e\cos E)dE. \qquad 3.52$$

ويعطي التكامل

$$n(t - t_0) = E - e\sin E. \qquad 3.53$$

يدعى الوسيط E بالإنحراف اللامركزي *eccentric anomaly*. يمكن إعتبار ثابتة التكامل t_0 زمن عبور القمر في نقطة الحضيض *perigee* (أقرب نقطة من المسار إلى الجسم المركزي). الطرف الأيسر من المعادلة يزداد مع الزمن. يمكن تعريف، عوضا عن الزمن t، متحولا جديدا $\overline{M}$ الإنحراف الوسطي *mean anomaly* ويعرّف كما يلي:

$$\overline{M} = n(t - t_0). \qquad 3.54$$

تدعى العلاقة

$$\overline{M} = E - e \sin E \tag{3.55}$$

بمعادلة كيبلر. وتعطى العلاقة مع الإنحراف الحقيقي ν بالمعادلة التالية

$$\tan \nu = \frac{\sqrt{1-e^2}\sin E}{\cos E - e}. \tag{3.56}$$

تأخذ كل الإنحرافات E، $\overline{M}$، ν قيمة الصفر عند مرورها بنقطة الحضيض. وهن يعرّفن موقع القمر في مستوي مداره وبالتالي فهن ملائمات لإتخاذهنّ كوسيط سادس للمدار. يفضل في جيوديزيا الأقمار الصناعية إتخاذ الإنحراف الوسطي $\overline{M}$ لأنه يمكن إستخراجه بشكل خطي مع الزمن. لحل قيمة E من قيمة $\overline{M}$، فإن العلاقة *3.55* يجب أن تحوّل إلى منشور سلسلة إهليلجية. يمكن إيجاد عدة حلول في المراجع المختصة. إحدى الحلول مثلا:

$$\begin{aligned} E = \overline{M} &+ (e - \frac{1}{8}e^3 + \frac{1}{192}e^5 - \frac{1}{9216}e^7)\sin \overline{M} \\ &+ (\frac{1}{2}e^2 - \frac{1}{6}e^4 + \frac{1}{48}e^6)\sin 2\overline{M} \\ &+ (\frac{3}{8}e^3 - \frac{27}{128}e^5 + \frac{243}{5120}e^7)\sin 3\overline{M} \\ &+ (\frac{1}{3}e^4 - \frac{4}{15}e^6)\sin 4\overline{M} + (\frac{125}{384}e^5 - \frac{3125}{9216}e^7)\sin 5\overline{M} \\ &+ \frac{27}{80}e^6 \sin 6\overline{M} - \frac{16807}{46080}e^7 \sin 7\overline{M} + \cdots \end{aligned} \tag{3.57}$$

من أجل لامركزيات صغيرة (مدارات أقمار نظام ال *GPS* مثلا) فإن علاقة التقريب المتتالي التالية تعطي حلا سريع جدا

$$\begin{aligned} E_0 &= \overline{M} \\ E_i &= \overline{M} + e \sin E_{i-1}, \qquad i = 1 \cdots \end{aligned} \tag{3.58}$$

3.2 حركة القمر الصناعي المعاقة *Perturbed Satellite Motion*

تم حتى الآن إعتبار حركة القمر الصناعي ذو الكتلة المهملة تحت تأثير قوة جذب مركزية لنقطة كتلية وحيدة M. تم وصف حركة كيبلر هذه بالعلاقة الأساسية *3.21*. يعطي تكامل تلك العلاقة

$$\begin{aligned} \mathbf{r}(t) &= \mathbf{r}(t; a_1 \cdots a_6) \\ \dot{\mathbf{r}}(t) &= \dot{\mathbf{r}}(t; a_1 \cdots a_6) \end{aligned} \tag{3.59}$$

حيث أن $a_1, \ldots, a_6$ ثوابت تكامل حرة الإختيار. يفضل إستعمال عناصر مدار كيبلر $a, e, i, \omega, \Omega, \overline{M}$.

يؤثر في الواقع عدد معين من القوى الإضافية على الأقمار الصناعية القريبة من الأرض. تدعى تلك القوى بالقوى المزعجة أو المشوّشة أو المعيقة *perturbing forces* لتمييزها عن قوة الجسم المركزي. يعاني القمر الصناعي من تسارعات إضافية بسبب تأثير تلك القوى، والتي يمكن أن تدمج بشعاع الإعاقة k_s. يمكن عندها كتابة معادلة الحركة المعمّمة كما يلي:

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{GM}{r^3}\mathbf{r} + \mathbf{k}_s. \tag{3.60}$$

إن القوى المعيقة هي في الواقع

- تسارعات بسبب عدم تكور وعدم تجانس توزع الكتلة في جسم الأرض المركزي $\ddot{r}_E$
- تسارعات بسبب أجسام سماوية أخرى (شمس، قمر وكواكب) $\ddot{r}_s$، $\ddot{r}_m$
- تسارعات بسبب المد والجزر *tides* لجسم الأرض والمحيطات $\ddot{r}_e$، $\ddot{r}_o$
- تسارعات بسبب إحتكاك الغلاف الجوي *atmospheric drag* $\ddot{r}_D$
- تسارعات بسبب ضغط الإشعاع الشمسي *solar radiation pressure* المباشر والمنعكس من الأرض $\ddot{r}_{SP}$، $\ddot{r}_A$

ويكون شعاع الإعاقة الكلي

$$k_s = \ddot{r}_E + \ddot{r}_s + \ddot{r}_m + \ddot{r}_e + \ddot{r}_o + \ddot{r}_D + \ddot{r}_{SP} + \ddot{r}_A. \tag{3.61}$$

يبين الشكل *3.7* رسم تمثيلي للقوى المعيقة.

شكل *3.7*: القوى المعيقة المؤثرة على القمر الصناعي في مداره.

يتعلق التسارع الكلي الناتج بموقع القمر *r*، أي كمية يجب تعيينها من حل المعادلة التفاضلية *3.60* كتابع للزمن وهذا يعني أن تكامل المعادلة مسألة معقدة. إحدى الطرق المتبعة عادة لحل مسائل معقدة كهذه هي بإعتماد تسهيلات معقولة، وتصحيح الأخطاء الناتجة بمرحلة ثانية مستقلة. تدعى تلك التسهيلات المعقولة وسطية *intermediate*. وبناء على ذلك يمكن تسمية حركة القمر الصناعي وفق المعادلتين *3.21* و *3.59* بأنها حركة وسطية *intermediate motion* أو حركة أساسية. يتم إستخدام إجرائين لحل مسألة الحركة المعاقة. في الحالة الأولى تعتبر إحداثيات القمر الصناعي معاقة *distrurbed* (مشوشة) بشكل مباشر. يعيّن تأثير القوى المعيقة على الإحداثيات بشكل عددي وتحسب الفروقات بين الإحداثيات المعاقة وغير المعاقة. تدعى هذه الطريقة بالتكامل العددي للمدار. في الحالة الثانية تعتبر ثوابت التكامل a_i للحالة الغير معاقة (علاقة *3.59*) كتوابع متعلقة بالزمن. يكون حل الحركة المعاقة بشكل رمزي

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{r}(t; a_1(t), \cdots a_6(t))$$
$$\dot{\mathbf{r}}(t) = \dot{\mathbf{r}}(t; a_1(t), \cdots a_6(t)), \qquad 3.62$$

حيث يجب إيجاد تعابير رياضية لعناصر المدار المرتبطة بالزمن. يدعى هذا الإجراء بالتكامل التحليلي *analytical integration*. تكمن الفكرة الأساسية بإعتبار الإعاقات كإنحرافات بين عناصر كيبلر الوسطية *intermediate* في زمن معين وبينها في نقاط زمنية *epochs* أخرى. لتطبيق الطريقة الأخيرة فمن الضروري الإبتداء بحل تقريبي لمعادلة الحركة. يمكن تحقيق هذه الشروط بإستخدام وسائط كيبلر من أجل الأقمار الصناعية القريبة من الأرض وكواكب المجموعة الشمسية.

3.2.1 تمثيل الحركة المدارية *Representation of Orbital Motion*

3.2.1.1 عوامل المدار المماسية أو الوسطية *Osculation and Mean Ortbital Elements*

إن الرغبة بالحصول على عناصر مدارية متعلقة بالزمن يقود إلى مفهوم عناصر المدار المماسية *osculation orbital elements*. بإعتبار قمر صناعي ذو حركة تتبع المعادلة *3.60* وله الموقع $r t_k$ في الزمن $t=t_k$ وشعاع السرعة $\dot{r}(t_k)$. فبإعتبار أن كل عوامل الإعاقة k_s يمكن حذفها في تلك اللحظة t_k، عندها تمثّل حركة القمر اللاحقة بحركة كيبلر الغير معاقة ذات الشروط البدائية $r(t_k)$، $\dot{r}(t_k)$. يدعى هذا المدار بالمماسي *osculating* أو اللحظي، لأنه يتطابق مع المدار الحقيقي المعاق في اللحظة t_k حيث العناصر البدائية متساوية. عمليا لاتختفي القوى المعيقة لحركة القمر الصناعي، لذلك يقع القمر على مدار مماسي آخر مختلف من أجل كل نقطة زمنية. يمكن إعتبار المدار الحقيقي للقمر الصناعي كمغلّف لكل المدارات المماسية ذات عناصر التماس $a(t_k)$، $e(t_k)$، ... $\overline{M}(t_k)$. بإعتبار t_k عامل زمني يزداد بإستمرار فيمكن تفسير حركة القمر المعاقة بكونها حركة دوبلر ذات وسائط متغيرة مع الزمن $a(t), e(t), i(t), \Omega(t), \omega(t), \overline{M}(t)$. تمثل تلك العناصر تقريبا جيدا في تطبيقات جيوديزيا الأقمار الصناعية القريبة من الأرض حيث أن قوة جذب الأرض هي القوة الرئيسية المؤثرة والعناصر المذكورة لاتتغير بسرعة. لذلك يمكن تقريب عناصر المدار بمنشور أسّي بدلالة فروق زمنية $(t-t_0)$ حيث t_0 زمن وسطي:

$$a_i(t) = a_i(t-t_0) + \dot{a}_i(t-t_0) + \ddot{a}_i(t-t_0)^2 + \ldots (i = 1, \ldots, 6) \qquad 3.63$$

يعود أصل العنصر المماس a_i إلى مجموع حدود (تغيرات) طويلة وقصيرة الأمد

$$a_i(t) = \overline{a}_i(t) + \Delta a_i(t) \, . \qquad 3.64$$

$\overline{a_i}(t)$ يحتوي مجموع أجزاء التغيرات الصغيرة التردد الزمنية القرنية *secular* (الذي يحدث مرة كل فترة طويلة، قرن أو عدة قرون) والثابتة، بينما يحوي $\Delta a_i(t)$ التغيّرات العالية التردد. تدعى الحدود $\overline{a_i}(t)$ بالعناصر الوسطية. وهكذا يمكن إعتبار العناصر الوسطية كعناصر مماسية بغياب الحدود الدورية *periodic terms*.

3.2.1.2 معادلات الإعاقة للاغرانج *Lagrange Perturbation Equations*

يجب إنشاء علاقة بين القوى المعيقة المؤثرة والتغيّرات المرتبطة بالزمن لعناصر المدار. شكّل لاغرانج (*1736-1813*) العلاقات الأساسية الملائمة. ندرج في مايلي مختصر العلاقات دون الدخول في التفاصيل الممكن الرجوع لها في المراجع المختصة. يمكن كتابة العلاقة *3.47* بالشكل

$$E_M = \frac{v^2}{2} - \frac{GM}{r} \qquad 3.65$$

حيث تمثل الثابتة E_M الطاقة الكلية *energy integral*. يمثل الحد الأول الطاقة الحركية للقمر الصناعي بكتلة واحدية *m=1*، والحد الثاني طاقته الكامنة *potential energy* بحيث أن الطاقة الميكانيكية الكاملة لحركة القمر الصناعي تبقى ثابتة في حال عدم وجود تأثيرات قوى خارجية. سبب الإشارة السالبة في حد الطاقة الكامنة هو إعتبار مبدأ الطاقة الكامنة موجود في اللانهاية. بكتابة العلاقة *3.65* من أجل أقرب نقطة للمدار من الجسم المركزي (الحضيض *perigee*) ينتج لدينا مع تجاوز التفاصيل

$$E_M = -\frac{GM}{2a} \qquad 3.66$$

حيث تعبّر تلك العلاقة عن كون طول نصف المحور الكبير لمدار قمر ما يتعلق بالطاقة الكلية للقمر فقط. يمكننا إذا كتابة

$$E_M = \frac{v^2}{2} - \frac{GM}{r} = -\frac{GM}{2a}$$

يدعى أيضا الحد السالب للطاقة الكلية $\frac{GM}{2a}$ بتابع القوة *F*. بإعتبار القيمة السالبة للطاقة الكامنة *V* والطاقة الحركية *T* يكون تابع القوة *F*:

$$F=V-T. \qquad 3.67$$

في حقل قوى غير مركزي تكون

$$\partial V = \frac{GM}{r} + R \qquad 3.68$$

$$F = \frac{GM}{r} + R - T = \frac{GM}{2a} + R \cdot \qquad 3.69$$

يحتوي التابع *R* كل مركبات الحد المركزي $\frac{GM}{r}$ ويدعى تابع الإعاقة أو طاقة الإعاقة *disturbing potential*.

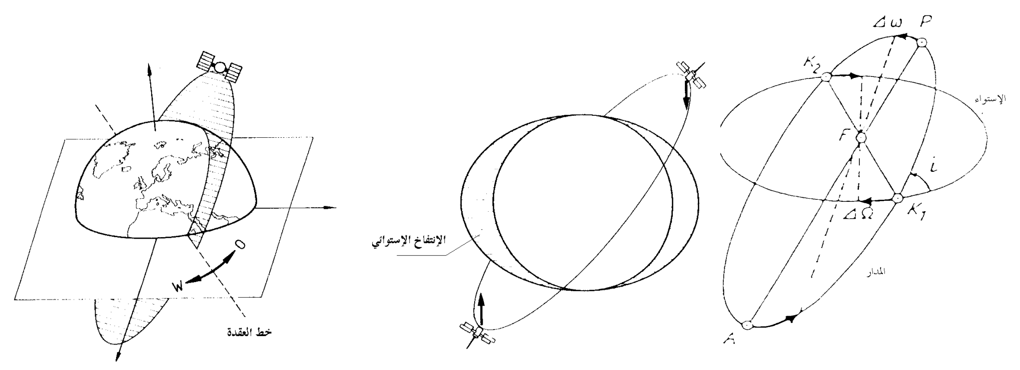
يتم، حسب لاغرانج، تكوين العلاقة بين *R* وبين تغيّرات عناصر المدار

$$\begin{aligned}
\frac{da}{dt} &= \frac{2}{na}\frac{\partial R}{\partial \overline{M}} \\
\frac{de}{dt} &= \frac{1-e^2}{na^2e}\frac{\partial R}{\partial \overline{M}} - \frac{\sqrt{1-e^2}}{na^2e}\frac{\partial R}{\partial \omega} \\
\frac{d\omega}{dt} &= -\frac{\cos i}{na^2\sqrt{1-e^2}\sin i}\frac{\partial R}{\partial i} + \frac{\sqrt{1-e^2}}{na^2e}\frac{\partial R}{\partial e} \\
\frac{di}{dt} &= \frac{\cos i}{na^2\sqrt{1-e^2}\sin i}\frac{\partial R}{\partial \omega} - \frac{1}{na^2\sqrt{1-e^2}\sin i}\frac{\partial R}{\partial \Omega} \\
\frac{d\Omega}{dt} &= \frac{1}{na^2e\sqrt{1-e^2}\sin i}\frac{\partial R}{\partial i} \\
\frac{d\overline{M}}{dt} &= n - \frac{1-e^2}{na^2e}\frac{\partial R}{\partial e} - \frac{2}{na}\frac{\partial R}{\partial a}.
\end{aligned} \qquad 3.70$$

يتطلب التكامل التحليلي لعلاقات الإعاقة *6.70* كون طاقة الإعاقة مكتوبة كتابع لعناصر المدار. يعتبر التكامل التحليلي أفضل طريقة لإدخال الإعاقات على مدارات الأقمار الصناعية.

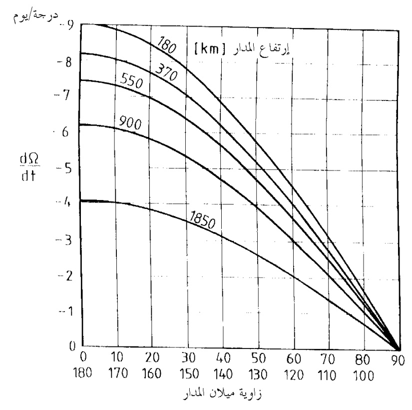
3.2.2 الحركة المعاقة بسبب تغيرات حقل الجاذبية الأرضية *Disturbed Motion due to the Anomalous Earth's Gravity Field*

القوة المعيقة المهيمنة على مدار الأقمار الصناعية القريبة من الأرض هي بسبب تفلطح الأرض (شكل *3.8*).



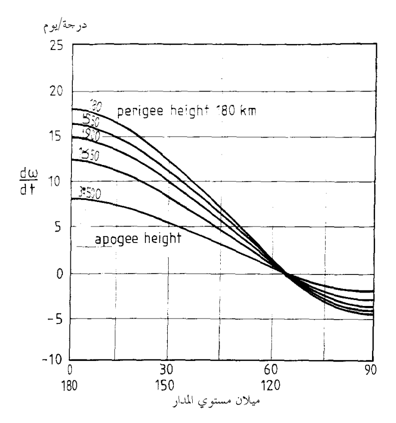
شكل *3.8*: سبق العقدة المسبّب بالإنتفاخ الإستوائي.

يولّد الإنتفاخ الإستوائي مزدوجة تدوير خفيفة على القمر الصناعي تحاول تدوير مدار القمر إلى داخل المستوي الإستوائي. ينتج تأثير مشابه لتأثير عملية السبق *precession* على محور دوران الأرض (فقرة *2.1.2*). يتحرك شعاع العزم الزاوي للمدار حول محور الأرض بعزم أعظمي، أي مستوي المدار والعقد (الصاعدة والهابطة) تتحرك غربا بالنسبة للمدار المباشر (عند العقدة الصاعدة) وشرقا بالنسبة للمدارات المعكوسة (عند العقدة الهابطة). يبين الشكل *3.9* نسبة تراجع العقدة. يمكن أن يصل التأثير إلى *9* درجات في اليوم من أجل المدارات القريبة من سطح الأرض (*200 km* >) ومن أجل ميول صغيرة لمستويات المدارات. لاتعاني المدارات القطبية من ظاهرة سبق العقدة (بإهمال حدود المرتبة العليا في توزع الكتلة). تفيد معرفة تأثير سبق العقدة *nodal precession* مثلا لتوليد فترات تكرار معينة لرصد الأرض، أو لتوليد مدارات متزامنة (مع الشمس مثلا).



شكل *3.9*: العلاقة بين إرتفاع المدار، زاوية ميلانه وسبق العقدة اليومي.

إن تفلطح الأرض له تأثير آخر يؤثر على أغلب المدارات اللامركزية وهو تدوير خط التكور *line of apsides* (شكل *3.1*) $d\omega/dt$ (شكل *3.10*).



شكل *3.10*: العلاقة بين ميلان المدار، الإرتفاع ودوران نقطة الحضيض *perigee*.

يعطي الشكل إنطباع عن هذا التأثير من أجل مدارات ذات إرتفاع *190 km* لنقطة الحضيض *perigee* وإرتفاعات مختلفة لنقاط المدارات المقابلة *apogee*. يدور خط التكور بإتجاه حركة القمر من أجل المدارات ذات الميلانات $i < 64.4°$ و $i > 116.6°$. من أجل الميول $64.4° < i < 116.6°$ يكون دوران خط التكور *apiside* عكس إتجاه حركة القمر.

3.2.2.1 إعاقات مسبّبة بالعوامل المكانية *Perturbations caused by Zonal Coeffiecients Jn*

من أجل تفصيلات إضافية للعلاقة بين الطاقة الثقالية المتغيرة للأرض وتغيرات مدار القمر الصناعي يستعمل منشور سلسلة بعوامل توافق دائرية *spherical harmonics* من أجل طاقة الأرض الكامنة، معروف في الجيوديزيا الفيزيائية:

$$V = \frac{GM}{r}\left(1 + \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}\left(\frac{a_e}{r}\right)^n (C_{nm}\cos m\lambda + S_{nm}\sin m\lambda) P_{nm}(\cos\vartheta)\right) \qquad 3.71$$

العوامل C_{nm} و S_{nm} هم عبارة عن تكاملات كتلة تصف توزع الكتلة داخل الجسم المركزي. a_e هو نصف القطر الإستوائي، و P_{nm} توابع لاغرانج. يمثل الحد الأول *GM/r* طاقة كرة متجانسة ويعود إلى حركة كيبلر ويدعى حد كيبلر. الحد المتبقي يعود إلى الطاقة المعيقة.

من أجل تقدير تأثير تغيرات حقل الجاذبية الأرضية على مدارات الأقمار الصناعية فيكفي، غالبا، تعيين التسارعات المسبّبة بعوامل التوافق الأولى. يتم هنا تبسيط المعادلة *3.71*. ويعوض عادة في جيوديزيا الأقمار الصناعية

$$C_{n0} = -J_n \qquad 3.72$$

وينتج عندها

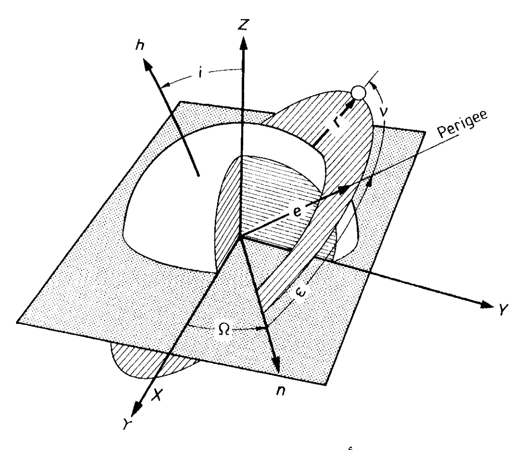
$$V = \frac{GM}{r}\left(1 - \sum_{n=2}^{\infty} J_n \left(\frac{a_e}{r}\right)^n P_n(\cos\vartheta)\right) \qquad 3.73$$

بتحديد النشر حتى درجة *n=6* وتعويض *L* من أجل زاوية خط العرض الجغرافية نجد:

$$\begin{aligned} V = \frac{GM}{r}\Bigg(1 &- \frac{J_2}{2}\left(\frac{a_e}{r}\right)^2 (3\sin^2 L - 1) + \frac{J_3}{2}\left(\frac{a_e}{r}\right)^3 (5\sin^3 L - 3\sin L) \\ &- \frac{J_4}{8}\left(\frac{a_e}{r}\right)^4 (35\sin^4 L - 30\sin^2 L + 3) \\ &+ \frac{J_5}{8}\left(\frac{a_e}{r}\right)^5 (63\sin^5 L - 70\sin^3 L + 15\sin L) \\ &- \frac{J_6}{16}\left(\frac{a_e}{r}\right)^6 (231\sin^6 L - 315\sin^4 L + 105\sin^2 L - 5)\Bigg). \end{aligned} \qquad 3.74$$

بإستعمال أشعة الواحدة *X, Y, Z* في النظام الإستوائي (شكل *3.11*) نحصل على التسارع $\ddot{r}$

$$\ddot{\mathbf{r}} = \frac{\partial V}{\partial x}\mathbf{X} + \frac{\partial V}{\partial y}\mathbf{Y} + \frac{\partial V}{\partial z}\mathbf{Z} \qquad 3.75$$



شكل *3.11*: أشعة الواحدة في الجملة الإستوائية.

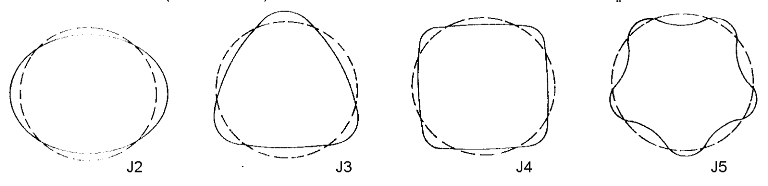
وبالتالي تكون مركبات التسارع $\ddot{x}$ ، $\ddot{y}$ ، $\ddot{z}$ في موقع القمر الصناعي *x*، *y*، *z*

$$\ddot{x} = \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{GMx}{r^3}\left(1 - J_2\frac{3}{2}\left(\frac{a_e}{r}\right)^2\left(5\frac{z^2}{r^2} - 1\right) + J_3\frac{5}{2}\left(\frac{a_e}{r}\right)^3\left(3\frac{z}{r} - 7\frac{z^3}{r^3}\right)\right.$$
$$- J_4\frac{5}{8}\left(\frac{a_e}{r}\right)^4\left(3 - 42\frac{z^2}{r^2} + 63\frac{z^4}{r^4}\right)$$
$$- J_5\frac{3}{8}\left(\frac{a_e}{r}\right)^5\left(35\frac{z}{r} - 210\frac{z^3}{r^3} + 231\frac{z^5}{r^5}\right)$$
$$\left. + J_6\frac{1}{16}\left(\frac{a_e}{r}\right)^6\left(35 - 945\frac{z^2}{r^2} + 3465\frac{z^4}{r^4} - 3003\frac{z^6}{r^6}\right) + \cdots\right) \quad 3.76$$

$$\ddot{y} = \frac{\partial V}{\partial y} = \frac{y}{x}\ddot{x} \quad 3.77$$

$$\ddot{z} = \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{GMz}{r^3}\left(1 + J_2\frac{3}{2}\left(\frac{a_e}{r}\right)^2\left(3 - 5\frac{z^2}{r^2}\right)\right.$$
$$+ J_3\frac{3}{2}\left(\frac{a_e}{r}\right)^3\left(10\frac{z}{r} - \frac{35}{3}\frac{z^3}{r^3} - \frac{r}{z}\right)$$
$$\left. - J_4\frac{5}{8}\left(\frac{a_e}{r}\right)^4\left(15 - 70\frac{z^2}{r^2} + 63\frac{z^4}{r^4}\right)\right) \quad 3.78$$

قيم عددية لعوامل التوافق الدنيا $J_n=-C_{n0}$ مثلاً: $J2=1082.63x10^{-6}$، $J3=-2.54x10^{-6}$، $J4=-1.62\ x10^{-6}$، $J5=-0.23\ x10^{-6}$، $J6=-0.55\ x10^{-6}$. يمكن شرح عامل توافق مكاني هندسيا كإنحراف معين عن شكل الكرة (شكل *3.12*).



شكل *3.12*: عوامل التوافق المكاني الدنيا.

يعود *J2* مثلا إلى تفلطح الأرض، *J3* للشكل المثلثي، *J4* للشكل التربيعي ... وهكذا.

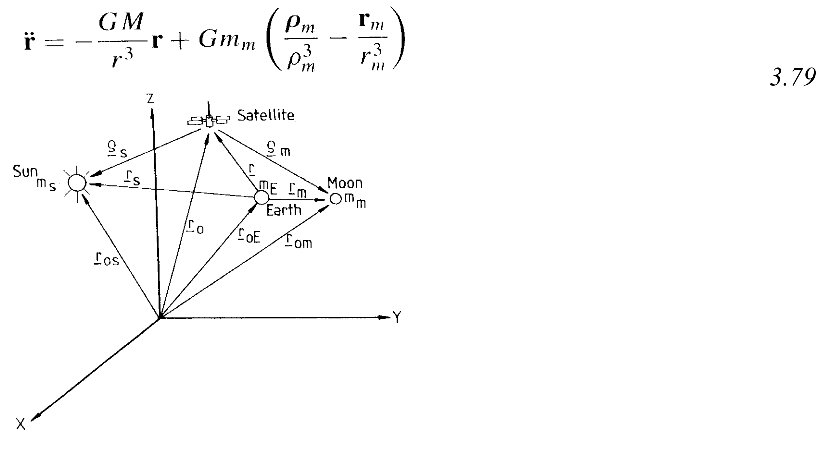
3.2.3 قوى إعاقة مسببة من الشمس والقمر *Perturbing Forces caused by the Sun and the Moon*

بإعتبار الشمس والقمر نقاط كتلية مثل القمر الصناعي فيمكن تطبيق علاقة الحركة الأساسية *3.21*:

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{GM}{r^3}\mathbf{r}.$$

بإعتبار كتلة القمر الصناعي بالنسبة لكتلة الشمس والقمر مهملة و *X, Y, Z* نظام إحداثيات عطالي مبدأه مركز كتلة الأرض، ومن الشكل *3.13* وبإعتبار $|\rho| = \rho, |r| = r$ و $m_E=M$، نجد

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{GM}{r^3}\mathbf{r} + Gm_m\left(\frac{\boldsymbol{\rho}_m}{\rho_m^3} - \frac{\mathbf{r}_m}{r_m^3}\right) \quad 3.79$$



شكل *3.13*: جذب القمر والشمس للقمر الصناعي.

الحد الأول هو نتيجة تأثير الأرض ويكون إذا تسارع الإعاقة الناتج عن تأثير جذب القمر على القمر الصناعي

$$\ddot{\mathbf{r}}_m = Gm_m \left(\frac{\mathbf{r}_m - \mathbf{r}}{(r_m - r)^3} - \frac{\mathbf{r}_m}{r_m^3} \right) \quad 3.80$$

ويكون تأثير جذب الشمس إذا

$$\ddot{\mathbf{r}}_s = Gm_s \left(\frac{\mathbf{r}_s - \mathbf{r}}{(r_s - r)^3} - \frac{\mathbf{r}_s}{r_s^3} \right) \quad 3.81$$

يجب أن تكون كتل ومواقع الأجسام المؤثرة معروفة، فمثلا تعتمد القيمة $1325.10^8\ km^3 .s^{-2}$ بالنسبة للحد Gm_s و $49.\ 10^2\ km^3 .s^{-2}$ من أجل القمر. تتخذ مواقع الشمس والقمر من جداول التقويمات الملاحية مثلا أو من شرائط مغناطيسية مجهزة من قبل مخبر *Jet Propultion Laboratory* الأمريكي.

يجب حساب هذا التأثير في حال حساب مدار القمر الصناعي، فقد تصل قيمة التسارع المؤثر على القمر الصناعي إلى $5.10^{-6}\ m/s^2$.

3.2.4 المد والجزر في جسم الأرض والمحيطات *Solid Earth Tides and Ocean Tides*

يغيّر المد والجزر في جسم الأرض وفي المحيطات الطاقة الثقالية للأرض ويسبب تسارعات إضافية تؤثّر على القمر الصناعي الذي يمكن إعتباره تأثيرا غير مباشر لجذب القمر والشمس.

يكتب تسارع القمر الصناعي المسبّب من عملية مد وجزر جسم الأرض كالتالي

$$\ddot{\mathbf{r}}_c = \frac{k_2}{2} \frac{Gm_d}{r_d^3} \frac{a_e^5}{r^4} (3 - 15\cos^2\theta) \frac{\mathbf{r}}{r} + 6\cos\theta \frac{\mathbf{r}d}{r_d} \quad 3.82$$

حيث m_d كتلة الجسم المعيق

r_d شعاع الموضع الجيومركزي للجسم المعيق

θ الزاوية بين r_d وشعاع الموقع للقمر الصناعي r

k_2 عدد لاف *Love* يصف طواعية جسم الأرض.

إن هذا التأثير يكون صغيرا على أقمار نظام ال *GPS* وله القيمة $10^{-9}\ m/s2$. من أجل الأقمار الصناعية ذات المدارات المنخفضة مثل *STARLETTE* يكون التأثير أكبر بكثير. لذلك يستعمل القمر *STARLETTE* لتعيين وحساب المد والجزر لجسم الأرض الصلب.

يعتبر تأثير المد والجز للمحيطات على تسارع القمر الصناعي في مداره صعبا جدا بسبب عدم إنتظام خطوط الشواطئ. بإستعمال معادلة عالمية *global* يمكن، من أجل أي نقطة P من سطح المحيط، حساب إرتفاعات المد والجزر وتغيرات الكتلة الناتجة عنها

$$dm_p = \rho_0 h(P,t) d\sigma. \quad 3.83$$

حيث ρ_0 كثافة الماء الوسطية، t الزمن و $d\sigma$ عنصر سطح. يكون تغير الطاقة الكامنة المسبّب من تغير الكتلة

$$\Delta U = \frac{G dm_p}{a_e} \sum_n (1 + k'_n) P_{n0} \cos\psi, \quad 3.84$$

الذي يمكن أن يربط بإعاقات المدار بربطه بحد الطاقة المعيقة *disturbing potential* من العلاقة *3.71*. يمثل العامل k'_n عوامل التشوه، P_{n0} كثيرات حدود لوجاندر *Legendre polynomials* و ψ الزاوية المركزية بين النقطة المبدئية A والنقطة المعتبرة P.

إن تأثير المد والجزر على الأقمار الصناعية صغير جدا. أكبر تأثير له يغيّر زاوية ميلان مستوي المدار i وزاوية الصعود المستقيم له Ω. لتلك التأثيرات دورات زمنية تتراوح بين *10* و *100* يوم وتكون غالبا أقل من *0.1*. من أجل أقمار ال *GPS* فإن التسارع الناتج يكون من مرتبة $10^{-9}\ m/s^2$ وهذا يوافق تغيّرا في الموقع المداري بمقدار أقل من *1 m* خلال يومين. من أجل الأقمار ذات المدارات المنخفضة يجب العناية الشديدة بحساب تلك التأثيرات.

3.2.5 إعاقة طبقات الغلاف الجوي *Atmospheric Drag*

من أجل الأقمار الصناعية ذات المدارات المنخفضة فإن أحد أهم الإعاقات الغير ناتجة عن الجاذبية هو الإحتكاك بالطبقات الهوائية. تتعلق القوى المكيانيكية الهوائية *aerodynamical forces* المؤثرة على المركبة الفضائية بعوامل

- الشكل الهندسي للقمر الصناعي
- سرعته
- إتجاه القمر الصناعي بالنسبة للتيار الهوائي

– كثافة، حرارة وتركيب الغازات.

لذلك فإن حساب دقيق لتلك التأثيرات تعتبر مسألة معقدة. تم التوصل تجريبيا إلى معادلة أعطت نتائج جيدة. إتجاه التسارع هنا هو عكس إتجاه قوة مقاومة الهواء (الغلاف الجوي)

$$\ddot{\mathbf{r}}_D = -\frac{1}{2} C_D \rho(\mathbf{r}, t) \frac{A}{m_s} (\mathbf{r} - \dot{\mathbf{r}}_a) |\mathbf{r} - \dot{\mathbf{r}}_a| \qquad 3.85$$

حيث

m_s كتلة القمر الصناعي

A المقطع الفعال لسطح القمر

C_D عامل الإحتكاك (خاص بكل قمر صناعي)

$\rho(r,t)$ كثافة الغلاف الجوي بالقرب من القمر الصناعي

r و $\dot{r}$ شعاع الموقع والسرعة للقمر الصناعي

$\dot{r}_a$ سرعة الغلاف الجوي بالقرب من القمر الصناعي

بفرض أن الغلاف الجوي يتحرك مع جسم الأرض الصلب نحصل، في نظام إحداثيات إستوائي مركزي، على

$$\dot{\mathbf{r}}_\mathbf{a} = \begin{pmatrix} \dot{x} + \dot{\theta} y \\ \dot{y} - \dot{\theta} x \\ \dot{z} \end{pmatrix} \qquad 3.86$$

حيث $\dot{\theta}$ معدل سرعة دوران الأرض. من أجل قمر صناعي كروي تكون $C_D=1$. من أجل سطوح أكثر تعقيدا، مثل إسطوانة، مخروط أو صفيحة، يأخذ C_D قيمة أكبر. تتعلق كثافة الغلاف الجوي إضافة للإرتفاع بعوامل أخرى مثل الموقع الجغرافي، فصول السنة، الوقت اليومي، نشاط الشمس والحقل المغناطيسي، ويمكن أن تحسب بمعادلات ملائمة. يمكن الحصول على معطيات عن نشاط الشمس والحقل المغناطيسي للأرض من منشورات علمية، مثل معطيات الشمس الفيزيائية *Solar Physical Data* من الإدارة الوطنية للمحيطات والغلاف الجوي الأمريكية *NOAA*. يتناقص تأثير الغلاف الجوي بازدياد الإرتفاع. من أجل المناطق العليا يمكن للنشاط الشمسي أن يسبب تغيّرات بالكثافة من رتبة *10* (عشرة أضعاف). يمكن للقوى المعيقة المؤثرة على القمر الصناعي أن تسبب تغيرات في التسارع من مرتبة 10^{-3}-10^{-9} m/s^2. يتأثر الإنحراف الوسطي $\overline{M}$ على الأكثر من تأثير الغلاف الجوي لأن تأثير قوة إحتكاك الغلاف الجوي موجه بإتجاه الحركة المدارية للقمر الصناعي. بسبب توازن الطاقة تتناقص الطاقة الكلية لحركة القمر الصناعي سويا مع الطاقة الحركية، وبالتالي ينقص طول نصف المحور الكبير للمدار a. وحسب قانون كيبلر الثالث، فإن السرعة الزاوية للقمر الصناعي سوف تزداد بسبب قوة إحتكاك الغلاف الجوي. يكون هذا التأثير كبيرا على أقمار نظام ال *TRANSIT* مثلا ذات الإرتفاع *1000 km*، بينما معدوما على أقمار نظام ال *GPS*.

3.2.6 ضغط الإشعاع الشمسي المباشر وغير المباشر *Direct and Indirect Radiation Pressure*

يؤثر الإشعاع المنبعث بشكل متواصل من الشمس على القمر الصناعي تأثيرين هما التأثير الناتج من الإشعاع الشمسي المباشر والتأثير الناتج عن إنعكاس الإشعاع الشمسي من الأرض (ويدعى تأثير *albedo*). تتناسب القوى المؤثرة على القمر الصناعي طردا مع مساحة القمر الصناعي الفعّالة، ودرجة قابلية العكس للسطح والبقع الشمسية (النشاط الشمسي). وتتناسب عكسا مع سرعة الضوء ومربع البعد بين الشمس والقمر الصناعي. يكون تسارع الإعاقة الناتج إذا

$$\ddot{\mathbf{r}}_{SP} = \nu P_s \frac{C_r O}{m} (AU)^2 \frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_s)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_s|^3} \qquad 3.87$$

حيث

P_s ثابت شمسي (ناتج من سرعة الضوء والنشاط الشمسي، بالواحدة الفلكية. الواحدة الفلكية تساوي $1.5x10^8$ *km*)

O/m نسبة سطح القمر الصناعي إلى كتلته

r,r_s أشعة الموقع للقمر الصناعي وللشمس في نظام إحداثيات إستوائي مثبت بالفضاء

C_r عامل قابلية العكس لسطح القمر الصناعي ($C_r=1.95$ من أجل الألمنيوم)

ν تابع الظل، حيث $\nu=0$ القمر الصناعي يقع في ظل الأرض

$\nu=1$ القمر الصناعي يقع في ضوء الشمس

$0<\nu<1$ القمر الصناعي يقع في منطقة نصف الظل

في الشكل 3.14 يقع القمر الصناعي في ضوء الشمس إذا تحققت العلاقة

$$D = r'.r'_s \rangle 0 \qquad 3.88$$

وفي الظل إذا كانت $D < 0$

$$|\mathbf{S}_c| = |\mathbf{r}' - D\mathbf{r}'_s| < a_e.$$

شكل 3.14: معادلة ظل إسطوانة.

a_e هو نصف محور الجسم المسبب للظل (الأرض)، و r'_s شعاع الواحدة بإتجاه الشمس.

هذه المعادلة تقريبية ولاتكفي لمتطلبات الدقة العالية. لتجنب إنقطاع حسابات المدار بالقرب من مناطق الظل يمكن إستخدام تابع الظل المهذب *smoothed*. وكذلك يمكن إستعمال الثابت الشمسي كمتحول لحساب نشاط شمسي متغير. كما يمكن إستعمال معادلات معقدة من أجل سطوح الأقمار الصناعية.

إن الحساب الدقيق لتأثير الإشعاع الشمسي على أقمار ال *GPS* صعب بسبب التركيب المعقد لها. يقسم عادة سطح القمر إلى عدة سطوح كصفائح وإسطوانات.

يؤثر الإشعاع الشمسي المباشر بإتجاه حركة المدار (*along track*)، ويمكن أن يصل لأكثر من *10 m* بعد عدة ساعات.

ينعكس جزء من الإشعاع الشمسي بواسطة الأرض. تدعى النسبة بين الأشعة المنعكسة والمباشرة ب *albedo*، وهو صعب الحساب بسبب توزع اليابسة، البحر والغيوم، ولكنه يساوي غالبا حوالي *10%* من التأثير المباشر. من أجل أقمار ال *GPS* يكون هذا التأثير بحدود *1%-2%*، لذلك يهمل عادة في حسابات مدارات أقمار نظام ال *GPS* إلا في حال حسابات أقواس مدارات طويلة جدا.

من أجل حسابات مسارات عالية الدقة هناك تأثيرات إعاقات إضافية تنتج تسارعات إعاقة أقل بكثير من $10^{-9}\ m/s^2$. وتلك التأثيرات هي مثلا

- إحتكاك مع جزيئات مشحونة كهربائيا في طبقات الغلاف الجوي العالية
- إشعاع حراري للقمر الصناعي
- تأثير إرتفاع درجة الحرارة على حدود مناطق الظل
- تأثير إلكترومغناطيسي في حقل المغناطيسي للأرض
- تأثيرات الغبار الكوني *inter planetary dust*.

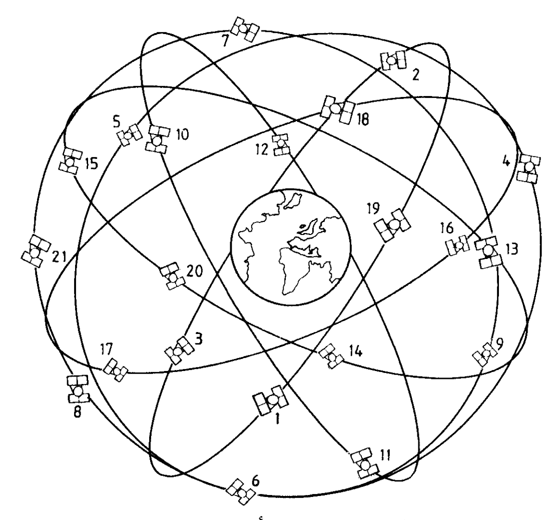
لأغراض عملية لا تؤخذ تلك التأثيرات بعين الإعتبار في جيوديزيا الأقمار الصناعية.

تم في هذا الفصل تقديم عرضا لحركة الأقمار الصناعية في مداراتها وموجزا عن العوامل المعيقة لتلك الحركة، وذلك كفكرة عامة للإلمام ببعض الأساسيات اللازمة قبل الدخول في تفاصيل نظام التوضع العالمي *GPS*.

4 نظام التوضع العالمي Global Positioning System GPS

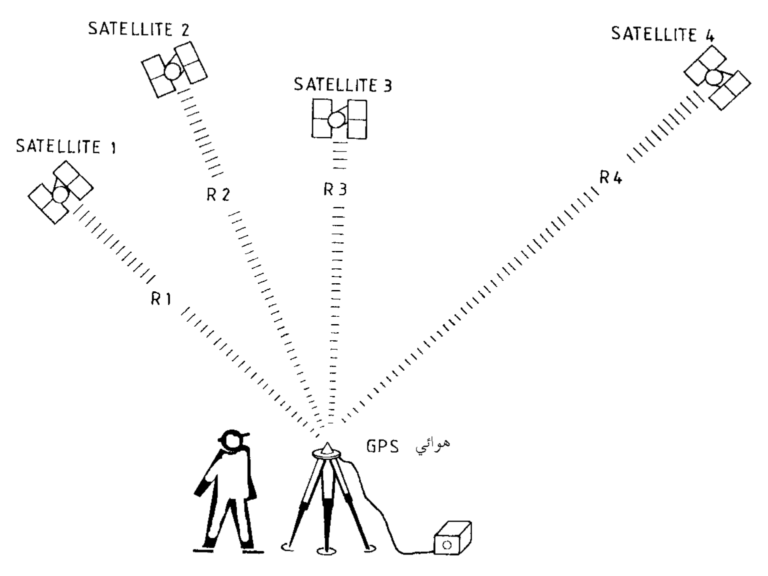
4.1 مدخل

إنّ نظام التوضع العالمي *NAVSTAR GPS* (*NAVigation System with Time and Ranging Global Positioning System*) هو نظام ملاحي يعتمد على موجات الراديو الصادرة من الأقمار الصناعية ويؤمّن بذلك معلومات دقيقة عن مواقع ثلاثية الأبعاد، ومعلومات ملاحية وعن الزمن للمستعملين المزوّدين بالأجهزة المناسبة. يمكن إستخدام النظام في كل أنحاء العالم وبشكل مستمر ومستقل عن الشروط الجوية. تم تطوير نظام ال *GPS* من قبل الولايات المتحدة الأمريكية منذ عام *1973* وهو بالأساس نظام عسكري. يتمتع المستخدمون المدنيون في العالم بإستخدام محدود له. لقد بدأ بإستخدامه لحلّ المسائل الجيوديزية منذ عام *1983*. يتألف النظام من مجموعته الكاملة من الأقمار الصناعية (*21* قمر) إضافة إلى ثلاثة أقمار *aktiv* إحتياطية فعالة (شكل *4.1*). الأقمار متوضّعة على مسارات بإرتفاع *20200 km* عن سطح الأرض. يؤمّن ترتيب التوزع الهندسي للأقمار تغطية لكلّ مناطق الأرض بحيث أنّه بأي وقت وفي أي مكان على الأرض هناك على الأقلّ أربعة أقمار واقعة فوق الأفق ويمكن رصدها بشكل متزامن *simultaneously*.



شكل *4.1*: نظام ال *GPS* المتألف من *21* قمر صناعي.

يعتمد مبدأ الملاحة الأساسي في نظام ال *GPS* على قياسات (آنية) لما يدعى أشباه المسافات *Pseudoranges* بين المستخدم وبين أربعة أقمار صناعية. يمكن تعيين إحداثيات المستخدم (محطة الإستقبال) إنطلاقا من إحداثيات القمر الصناعي المعرّفة في إطار مرجعي مناسب (شكل *4.2*). من وجهة نظر هندسيّة بحتة يكفي قياس المسافات إلى ثلاثة أقمار فقط. إن قياسا رابعا ضروري أيضا لأنّ نظام ال *GPS* يستخدم طريقة قياس المسافة بإتّجاه واحد (*one-way ranging technique*)، وساعة اللاقط *receiver clock* ليست متزامنة مع ساعة القمر. إن خطأ تزامن تلك الساعتين *synchroniyation error* هو سبب تسمية (أشباه المسافات) ويجب تعيينه كمجهول إضافي.



شكل *4.2*: قياس متزامن لأشباه الأطوال إلى أربعة أقمار.

مختلفا عن نظام ال *NNSS TRANSIT* (*Navy Navigation Satellite System*)، الذي كان معتمدا رسميا من قبل البحرية الأمركية *NAVY* منذ عام *1964*، فإن نظام *GPS* يؤمّن معلومات ملاحية في الزمن الحقيقي (لحظيا وفوريا *Real Time*)، ونظرا للتطور التقني خلال عشرين عاما فإن *GPS* يؤمّن دقّة أعلى بكثير من نظام الترانسيت *TRANSIT* (فقرة *1.4*). فيما يلي مقارنة بين خواص النظامين (جدول *4.1*).

الخاصة	GPS	TRANSIT
إرتفاع المسار	*20200 km*	*1000 km*
الطور *period*	*12 h*	*105 min*
الترددات *frequencies*	*1575 MHz*	*150 MHz*
	1227 MHz	*400 MHz*
المعطيات الملاحية	*X,Y,Z,t: 4D* وسرعة	Φ, λ :*2D*
الجاهزية *availability*	متواصل	*15-20 min* خلال العبور الواحد
الدقة *accuracy*	*15 m (P-Code/SA)* *0.1* عقدة	*30-40 m* خطأ سرعة
مجموعة الأقمار	*21-24*	*4-6*
التوزع الهندسي	متكرر	متغيّر
ساعة القمر الصناعي	روبيديوم *rubidium*، سيزيوم *cesium*	كوارتز *quartz*

جدول *4.1*: مقارنة بين خواص نظامي ال *GPS* وال *TRANSIT*.

تمّ تصميم نظام التوضع العالمي *GPS* للحصول، لحظيا وفوريا *real time*، على دقّة ملاحية من *±10 m* إلى *±15 m*، وللإستعاضة عن نظام ال *Transit*. وقد كان منتظرا منذ البداية أن هذا النظام سوف يؤمّن قياسات جيوديزية بدقة عالية جدا. الباحث *Anderle 1979* توقّع، خلال مؤتمر للجيوديزيا بواسطة الأقمار الصناعية في أثينا، الحصول على دقّة *±10 cm* على مسافة *2000 km*. هذه الفكرة لاتزال موضوع نقاش، ولم يتمّ تحقيقها حتى الآن بالتطبيقات الروتينية. ولكن الخبرة العملية قد بيّنت أن تشكيلة واسعة من المسائل في الجيوديزيا والجيوديناميك تمّ إيجاد حلا لها بواسطة نظام ال *GPS*.
يمكن تقسيم مكوّنات نظام ال *GPS* إلى عدّة أقسام رئيسية:

– القسم الفضائي *Space Segment*: الأقمار الصناعية الفعّالة.
– قسم التحكم *Control Segment*: لمراقبة النظام والزمن، وحساب المسارات.
– قسم المستعمل *User Segment*: أنواع مختلفة من اللواقط *receivers*.

هناك نظام سوفييتي مشابه ل *GPS* يدعى *GLONASS* (فقرة *4.16.8*). إن المعلومات المفصّلة المتوفرة عن هذا النظام قد تم تداولها منذ فترة ليست بعيدة. يطرح عدّة من منتجي أجهزة الإستقبال *Receivers* الآن في الأسواق أجهزة تلتقط إشارات كلا النظامين للإستفادة من تغطية مثالية بإستخدام إشارات أقمارهما.

4.2 *القسم الفضائي* Space Segment

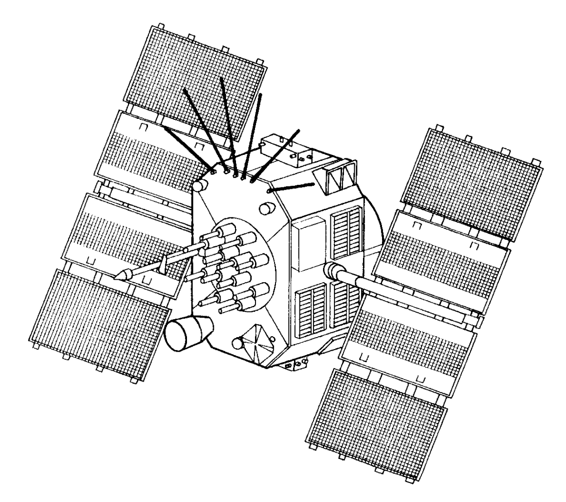
ويتألف من المجموعة الكاملة للأقمار الصناعية (*21* قمر صناعي) إضافة إلى ثلاثة أقمار إحتياطية فعّالة *aktiv* متوضّعة في مسارات دائرية تقريبا (قطع ناقص *Ellipse*) وموزعة على *6* مستويات ذات ميلان زاوي *Inclination* مقداره $55°$ درجة، تتواجد *4* أقمار في كل مستو (شكل *4.1*). إرتفاع المدار هو *20200 km* تقريبا عن سطح الأرض وهو يوافق نصف قطر كبير للمدار *26600 km* تقريبا. زمن الدوران هو *12* ساعة بالضبط حسب الزمن النجمي *sidearial time*، بذلك يتكرر شكل التوزع الهندسي للأقمار يوميا بتسبيق زمني مقداره *4* دقائق بالنسبة للزمن العالمي *universal time* (فقرة *2.2.2*). إن فرق زاوية الصعود المستقيم *Right Ascension* Ω (فقرة *3.1.3*)، مقاسة على المستوي الإستوائي، بين كلّ من المستويات الستة للمدارات تبلغ *60* درجة.

أنماط الأقمار المستخدمة في الوقت الراهن هي *II, IIA, IIR*.

تمّ البدء بإطلاق أقمار نمط المجموعة *Block II* في عام *1989* وذلك بإستخدام صاروخ *McDonell Douglas Delta 2* . الديمومة (الحياة) التصميمية للقمر هي *7,5* سنة.

أقمار النمط *IIR* مزودة أيضا بإمكانيات قياس المسافات إلى أقمار أخرى لحساب إحداثيات كلّ أقمار المجموعة مباشرة ومن ثمّ إرسالها إلى محطات المراقبة الأرضية. الشكل *4.3* يبيّن تمثيلا لقمر من نمط *Block II*. تستمدّ الطاقة الكهربائية بواسطة صفيحتي إستقبال الطاقة الشمسية، يبلغ السطح المستقبل لكلّ واحدة منها مقدار $7,5\ m^2$. هناك بطارية إضافية لتأمين الطاقة أثناء تواجد القمر الصناعي في منطقة ظلّ الأرض (فقرة *3.2.2.5*). وزن القمر يبلغ *845 kg* وله نظام تسيير لتوازن موضعه في المدار. يتغير المدار كلّ عدّة أسابيع أو أشهر تغيّرا يمكن حسابه. يحمل كلّ قمر على متنه مولّدات موجات (ساعات ذريّة دقيقة) *Frequency Standards* عالية الدقة $1x10^{-12}$ - $1x10^{-13}$ (فقرة *2.2.5*) مشكّلة قاعدة زمنية دقيقة.

أقمار النمط *II* مزوّدة بمولّدي موجات (ساعات ذرية) من الروبيديوم *rubidium* وإثنين من السيزيوم *cesium* (فقرة *2.2.5*).



شكل *4.3* : شكل تمثيلي لقمر من نمط *II*.

يولّده مولّد الترددات الموجود في القمر الصناعي تردّدا أساسيا ثابتا مقداره *10,23 MHz*. يرسل كل قمر إشارتين بترددين مختلفين مشتقّين من هذا التردد الأساسي، وهما:

L_1 :154x10.23 MHz=1575.42 MHz (≅19.05 cm)

L_2 :120x10.23 MHz=1227.60 MHz (≅24.45 cm)

الإشارات المرسلة هي الإشارات الملاحية *Codes* (كود أو شيفرة)، ومعلومات ملاحية وعن النظام *Messages* (أو أخبار). الإشارات الملاحية *Codes* مضمّنة *modulated* وموجودة على الموجات الحاملة L_1,L_2 كمقاطع *Sequences* تدعى التشويش شبه العشوائي *PRN pseudo random noise*. الموجة الحاملة L_1 تحمل كلا الإشارتين الملاحيتين (*Codes* الشيفرات)، وهما الشيفرة الدقيقة *P-Code (Precise Code)*، والأقلّ دقّة *C/A-Code (Course Aquisition Code)*. الموجة الحاملة L_2 تحمل فقط الشيفرة الدقيقة *P-Code*. مناقشة مسهبة لإشارتي القمر سوف تتبع لاحقا (فقرة *4.4*).

يتمّ تمييز الأقمار الصناعية إمّا برقم العربة الفضائية *Space Vehicle Number SVN* أو رقم القمر بالنظام *NAVSATR number*، المستند على مرحلة إطلاقه ورقم التشويش شبه العشوائي له *pseudo random noise PRN*. إنّ الطريقة الأخيرة موثوقة أكثر، نظرا لأنّ كلّ قمر يملك تشويشا شبه عشواي خاصا به *PRN* وأغلب الأجهزة المستعملة في الأسواق تميّز الأقمار بأرقامها هذه.

4.3 *قسم التحكم* Control Segment

مهمته:

- مراقبة النظام والتحكّم به بشكل مستمر
- تعيين زمن النظام *GPS System Time*
- التنبؤ بالمواقع اللاحقة للأقمار *Ephemeris* وسلوك ساعاتها *Satellite Clocks* (مولّدات الترددات)
- التجديد الدوري للمعلومات الملاحية *Navigation Messages* لكل قمر.

يتكوّن قسم التحكم والمراقبة من محطة التحكّم الرئيسية *Master Control Station MCS* وعدّة محطات مراقبة *Monitor Station MS* متوضعة حول العالم وهوائيات أرضية *Ground Anntena GA* من أجل تحميل المعطيات إلى الأقمار. إنّ قسم التحكّم الفعّال حاليا *Operational Control Segment OCS* لنظام *GPS* يتألف من *MCS* في كولورادو *Colorado Springs USA*، ثلاثة محطات مراقبة وهوائيات أرضية في كل من *Kajalein, Ascension and Diego Garcia*. ومحطتي مراقبة إضافيتين في *Colorado Springs and Hawaii* (شكل *4.4*).



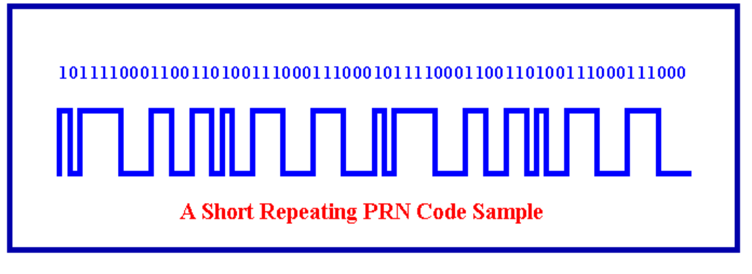
شكل *4.4* : قسم التحكم مع محطات الرصد.

تستقبل محطات المراقبة كلّ إشارات الأقمار وتحسب منها أشباه المسافات *Pseudoranges* لكل الأقمار المرصودة وترسل معطيات المسافات مع معطيات عن قياسات الأحوال الجوية *Meteorological data* المحلية إلى محطة التحكم الرئيسية *MCS*. تستخدم تلك المعطيات في محطة التحكم الرئيسية *MCS* لإعادة حساب المواقع اللاحقة للأقمار *Satellite*

Ephemeris و سلوك ساعاتها وتشكيل المعلومات الملاحية *Navigation Messages*. ترسل المعطيات الناتجة إلى الهوائيات الأرضية ليتمّ تحميلها (إرسالها) إلى الأقمار الممكن رصدها وذلك بواسطة موجات من الحزمة *S-Band S* (فقرة *2.3.3*). نظرا لتوزع الهوائيات الأرضية فهناك على الأقل ثلاث إتصالات باليوم بين قسم التحكم وبين كل قمر من الأقمار. يعيّن نظام *GPS* الزمني من مولّد ترددات *Oscillator* في محطة مراقبة مختارة. يحقق التوزع الجغرافي لمحطات المراقبة متطلبات نظام ملاحي فعّال. ولكن هذه التغطية ليست في كل الحالات مرضية للحصول على مسارات دقيقة لإستخدامها في التطبيقات الجيوديزية وبشكل خاص التطبيقات الجيوديناميكية. هناك شبكات محطات مراقبة مكثفة أكثر، تديرها مؤسسات مدنية وطنية ودولية.

4.4 مبدأ الرصد وتركيب الإشارة Observation Principle and Signal Structure

تقاس المسافات في نظام ال *GPS* بإتجاه واحد. إن القياس الأساسي هو زمن إنتقال الإشارة من هوائي القمر الصناعي إلى هوائي اللاقط على الأرض. يتمّ تحويل هذا القياس إلى مسافة وذلك إعتمادا على سرعة إنتشار الإشارة (فقرة *2.3*). بشكل عام لايمكن إفتراض أن الساعتين متزامنتين بدقة (ساعتي القمر واللاقط). لذلك يحتوي زمن إنتشار الإشارة المقاس خطأ تزامن نظامي (*Time bias*). تدعى الأطوال المغلوطة الناتجة بأشباه الأطوال *Pseudorange*، لذلك يمكن إعتبار مبدأ القياس الأساسي في نظام ال *GPS* هو تعيين أشباه الأطوال. الشكل *4.2* يبيّن أننا نحتاج لقياس أشباه الأطوال إلى أربع أقمار بشكل متزامن للحصول على الإحداثيات الثلاثية لهوائي نقطة الرصد وخطأ تزامن الساعة. كمعطيات يجب أن يتوفر لدينا إحداثيات وزمن (*Satellite Time*) معروفة للقمر. يجب على إشارات نظام ال *GPS* أن تؤمّن طريقة لتحديد الموقع في الزمن الحقيقي (*Real Time*). يتمّ تحقيق ذلك بتضمين *modulating* الإشارة الحاملة بما يدعى شيفرة التشويش شبه العشوائي *Code PRN*، وهو عبارة عن مجموعات من قيم ثنائية (إما صفر أو واحد، أو إما *-1* أو *+1*) والتي يبدو أنها عشوائية، ولكن يمكن أن تعرّف بدقة (شكل *4.5*). يتم إشتقاق أشباه الأطوال من زمن إنتشار إشارة ذات كود *PRN* معروف. هناك نوعين من الكود (الشيفرة) كما تمّ ذكره سابقا، الأول هو *P-Code* (*Precise* دقيق أو *Protected* محمي) والثاني *C/A-Code* (*Clear Aquisition* إلتقاط واضح).



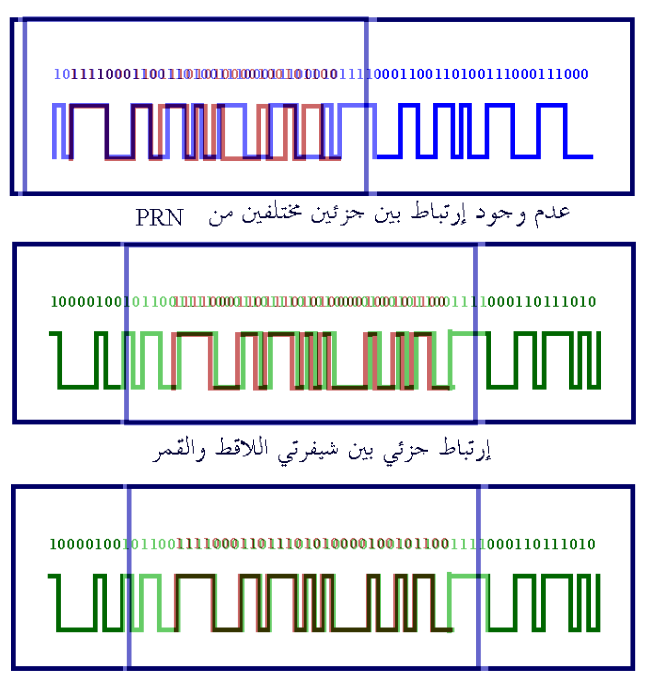
شكل *4.5*: جزء من شيفرة التشويش شبه العشوائي.

إن تردد ال *P-Code* يبلغ *10.23 Mhz* (وهو التردد الأساسي لساعة القمر الصناعي). هذا يعني *10.23* مليون قيمة ثنائية (في النظام العددي الثنائي *Binary*) في الثانية، ويمكن القول (*10.23 million Chip/second*). إن طول الموجة الموافق لكل *Chip* هو حوالي *30 m*. إن طول هذا الكود (الشيفرة) هو *266* يوم، تخصّص أجزاء منه (بطول *7* أيام لكل جزء) لأقمار متعددة. نتيجة لذلك يمكن لكل الأقمار أن ترسل إشارات بنفس التردد، ولكن كل قمر يعرّف نفسه بواسطة الجزء الخاص به من الشيفرة التي يبلغ طولها *7* أيام. هذه الأجزاء تجدّد كل إسبوع (تعطى قيمة الصفر) وذلك في منتصف ليلة كل سبت الساعة صفر حسب التوقيت العالمي 0^h *UT*. هذا الكود (الشيفرة *P-Code*) هو الكود الرئيسي في الملاحة ومحمّل على كل من الإشارتين L_2, L_1.

يبلغ طول الشيفرة الأخرى *C/A-Code 1* ميللي ثانية، وهذا يوافق ترددا قدره $f_0/10=1.023$ *Mhz* (جدول *4.2*)، وهذا يعني أن تردد قيم التضمين (*+1, -1*) يساوي *1.023 MHz* (*1.023* مليون مرة كل ثانية). بإعتبار أن طول فترة الشيفرة *1 ms* يكون عدد العناصر (*+1* أو *-1*) هو *1.023 MHz x1 ms=1023* عنصر. نسبة تردد الموجة الحاملة إلى تردد الشيفرة هي *10.23 x154/1.023=1540*. وهذا يعني أنه كل *1540* طول موجة من الموجة الحاملة يظهر عنصر

تضمين، وبإعتبار أن $\lambda=0.19\ m$ ينتج طول الموجة للشيفرة $0.19\ m \times 1540=293\ m$. يتم تحميل هذا الكود حاليا فقط على الإشارة الحاملة L_1.

لتعيين زمن إنتشار إشارة القمر الملتقطة يحتاج المستعمل إلى نسخة من جزء الكود (الموجود على إشارة القمر) داخل اللاقط. يتم الحصول على الزمن Δt من خلال عملية الإرتباط *cross correlation* بين الإشارتين الملتقطة والمولّدة في اللاقط. يصار في هذه العملية إلى جداء الإشارتين وتكوين تابع الإرتباط *correlation function*. من إحدى ميزات التشويش شبه العشوائي *PRN* أنه يأخذ القيمة $+1$ (إرتباط أعظمي) فقط في حال تطابق التردد والطور وتضمين الطور للإشارتين معا. بعد تطابق الترددين والطورين يتم زيحان (تغيير الطور *Phase Shift*) جزء الشيفرة هذا مع الزمن وبالتدريج وتتمّ دراسة إرتباطه مع إشارة الكود الملتقطة وذلك حتى يتم الحصول على إرتباط أعظمي (شكل *4.6*). زمن الإنزياح *time delay* اللازم لذلك (في جزئي الكود المعالجين) هو مقياس لزمن إنتشار الإشارة بين هوائيي القمر واللاقط على الأرض. هذه الطريقة تدعى رصد طور الشيفرة *Code Phase Observation*.



شكل *4.6*: زيحان أجزاء الكود (جزء يولّد في اللاقط والآخر يتمّ إستقباله من القمر) للحصول على إرتباط أعظمي.

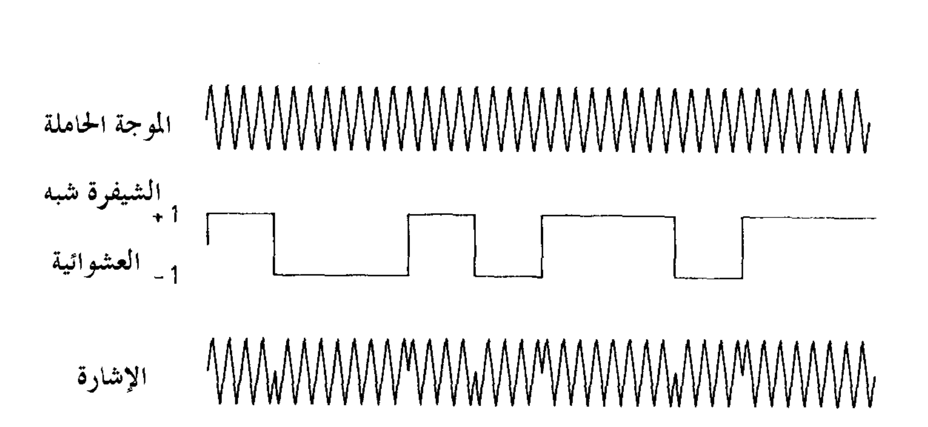
من أجل التطبيقات الجيوديزية الدقيقة يجب أن يتمّ إشتقاق أشباه الأطوال من قياسات الطور (*Phase Observation*) للإشارات الحاملة (بأطوال موجات *19 cm, 24 cm*) بسبب الدقة الأكبر بكثير. يقوم اللاقط بقياس فرق الطور *phase difference* بين إشارة القمر الملتقطة (والتي عانت من إنزياح بسبب تأثير دوبلر *doppler effect*، فقرة *1.4.3*) وإشارة مولّدة في اللاقط. هذه الطريقة تحتاج إلى حلّ مشكلة الغموض *Ambiguity* (فقرة *4.9.3*).

النوع الثالث من الإشارات المبثوثة بواسطة أقمار نظام ال *GPS* هي الأخبار أو المعلومات المبثوثة (*Broadcast Messages*). الخبر الواحد يتم بثه بتردد بطيء (*50 bits/sec*) ويكرر نفسه كل *30* ثانية. إن كل من جزئي الشيفرة مزود بتلك المعلومات المبثوثة. الخواص الرئيسية لأنواع الإشارات الثلاثة المستعملة في قياسات ال *GPS* (الموجة الحاملة، الكود أو الشيفرة وإشارات المعطيات أو المعلومات) موجودة في القائمة (*4.2*)
.

الساعة الذرية (سيزيوم Cs، روبيديوم Rb) التردد الأساسي	10.23 MHz (ميغا هيرتز)
الإشارة الحاملة L_1	154x10.23 MHz
التردد L_1	1575.42 MHz
طول الموجة L_1	19.05 cm
الإشارة الحاملة L_2	120x10.23 MHz
التردد L_2	1227.60 MHz
طول الموجة L_2	24.45 cm
تردد الشيفرة *P-Code chipping rate*	10.23 MHz (Mbps)
طول موجتها	29.31 m
طول فترتها *Period*	266 يوم، 7 أيام لكل قمر
تردد الشيفرة *C/A-Code chipping rate*	1.023 MHz (Mbps)
طول موجتها	293.1 m
طول فترتها	1 millsecond ميللي ثانية
تردد إشارة المعطيات (المعلومات)	50 bps
طول دور الإشارة *cycle length*	30 sec

قائمة 4.2: إشارات نظام ال GPS.

إن تكوين الإشارة يسمح بقياس كلا من الطور *Phase* وإنحراف الطور *Phase shift* (تأثير دوبلر *doppler effect*)، إضافة للقياس المباشر لزمن إنتشار الإشارة (شكل 4.7).



شكل 4.7: تركيب إشارات نظام ال GPS.

يمكن وصف الإشارة L_1 بالعلاقة التالية:

$$S_{L1}(t) = A_P P_i(t) sin(\omega_1 t) + A_c C_i(t) D_i(t) cos(\omega_1 t) \qquad 4.1$$

حيث:

A_p: مطال الكود *P-Code*

$P_i(t)$: جزء الكود *P-Code* بقيم ± 1

$D_i(t)$: تدفق المعلومات بقيم ± 1

A_c: مطال الكود *C/A-Code*

$C_i(t)$: جزء الكود *C/A-Code* بقيم ± 1

$A.\ sin(\omega_1 t)$: الإشارة الحاملة

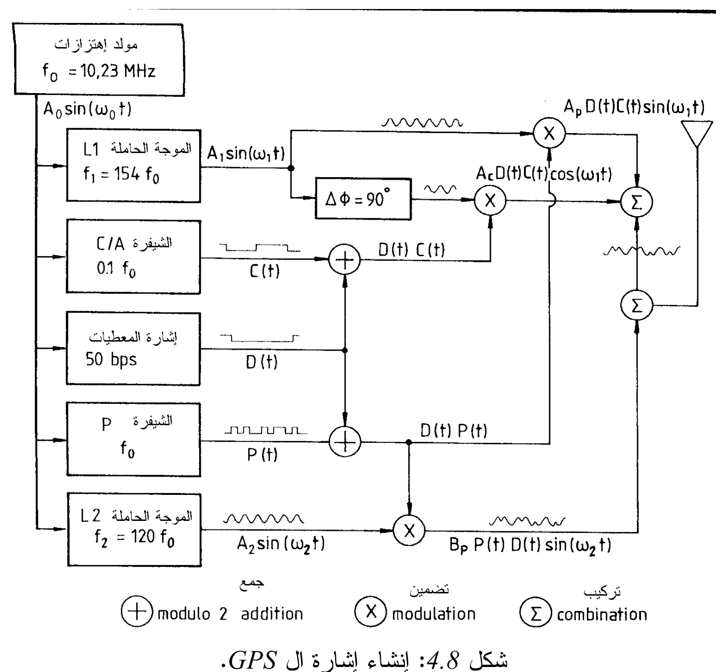
الدليل i يشير إلى القمر رقم i.

الإشارة L_2 لها تركيب أبسط لأنها لاتحتوي على شيفرة *C/A-Code*

$$S_{L2}(t) = B_P P_i(t) D_i(t) sin(\omega_2 t) \qquad 4.2$$

هنا تعني B_P مطال الكود.

يبيّن الشكل *4.7* كيفية تركيب إشارة نظام ال *GPS* من الشيفرة *Code* والإشارة الحاملة *Carrier*، هذه الطريقة تدعى تضمين ثنائي متناوب الطور *Binary biphase modulation*، لأن الشيفرة وإشارة المعلومات تعتبر تيارات معطيات ثنائية *binary data streams*، هناك فقط إمكانيتين لتضمين الطور. إن إنتقال الشيفرة من *1-* إلى *1+* أو من *1+* إلى *1-* يسبب تغيير في الطور *phase shift* مقداره *°180*. تحمل الإشارة الأولى L_1 الشيفرتين معا. يتم تحقيق ذلك بطريقة إسمها تربيع الطور *phase quadrature*. تفصل الإشارة L_1 الأصلية ويتم تغيير الطور فيها بمقدار *90* درجة قبل إدماجها بإشارة الشيفرة *C/A-Code*، وبعدها تجمع مع إشارة الشيفرة المضمّنة *P-Code*. هذه العملية مشروحة من خلال العلاقة *4.1* والشكل *4.8*.



شكل *4.8*: إنشاء إشارة ال *GPS*.

إن طريقة التضمين الثنائي متناوب الطور *Binary biphase modulation* بواسطة مقاطع من شيفرة التشويش شبه العشوائي *PRN* تنتج عرض نطاق ترددي *Bandwhidth* (الفرق بين أعلى وأخفض تردد مستعمل في زمرة ترددات مختلفة) واسعا للإشارات الملاحية. هذه الطريقة تحدّ من تداخل الإشارات الأخرى. طيف الشيفرة *P-Code* يملك عرض نطاق ترددي قدره *20 MHz*، وهذا يوافق دقّة تبلغ *1 nanosecond* (*1* نانو ثانية= $1x10^{-9}$ ثانية) وهذا ما يوافق بالتالي *30 cm* (بإعتبار العلاقة *2.69*) في شروط جيدة (نسبة الإشارة إلى التشويش *Signal/Noise* جيدة). عرض النطاق الترددي للشيفرة الأخرى *C/A-Code* يبلغ *2 MHz*، وهذا ما يوافق تخفيضا لدقة الإشارة بمقدار عشرة أمثال.

الدخول الى الشيفرة الدقيقة *P Code* ممكن فقط للّواقط المتزامنة بشكل دقيق مع زمن النظام، والمتوضّعة في أماكن معلومة بدقة. لذلك فإن الدخول إليه يتحقق بشكل عام بواسطة الشيفرة *C/A-Code* الأقصر بكثير وذلك عن طريق المعلومة المسماة *Hand Over Word HOW* (بما معناه الكلمة الأولى أو العلوية)، وهي الكلمة التي تحوي عدد ال *Z* (*Z-Count*) وتظهر على رأس كلّ مجموعة من المعلومات المبثوثة ضمن الإشارة (فقرة *4.5.3*). عدد ال *Z* هنا يعني العدد الصحيح لفترات ال *1.5* ثانية منذ بداية أسبوع نظام ال *GPS* (*GPS week*) وبذلك يتم تمييز زمن القياس *data record* في الزمن المرجعي للنظام (*GPS time*).

4.5 *تعيين المدار وطريقة تمثيله* Orbit Determination and Orbit Representation

4.5.1 **تعيين التقويمات المبثوثة** *Broadcast Ephemeris*

لحلّ المهمات الملاحية، يحتاج المستخدم إلى معرفة مباشرة وفورية *real time* لمواقع الأقمار الصناعية وكذلك معلومات عن الزمن (زمن النظام). يؤمّن ذلك بواسطة معلومات المدار (أو الخبر الملاحي *Navigation Message*) الموجودة في إشارة المعطيات الإضافية المذكورة في القائمة *4.2*. تحسب هذه المعلومات الملاحية في قسم التحكّم وتبثّ إلى المستعملين عن طريق الأقمار *Satellites*.

يتمّ الحصول على التقويمات المبثوثة على مرحلتين. يتم في المرحلة الأولى حساب ما تدعى التقويمات المرجعية، وذلك إعتمادا على قياسات مدتها سبعة أيام من محطات المراقبة الخمسة بإستخدام برامج واسعة لحساب المدارات. في المرحلة الثانية، يتم حساب الفروقات بين القياسات الراهنة في محطات المراقبة والتقويمات المرجعية، وتعالج للحصول على تصحيحات للتقويمات المرجعية.

لهذا الغرض يتم قياس أشباه المسافات بإعتماد الشيفرة وقياس دوبلر(فقرة *1.4.3*) وذلك لكل الأقمار المرئية وفي كل محطات المراقبة. تصحح القياسات بسبب تأخير إنتشار الموجات عبر طبقة الإيونوسفير *Ionosphere* وطبقة التروبوسفير *Troposphere* (فقرة *2.3.2* وفقرة *4.14.4*) وكذلك بما يخص التأثيرات النسبية *relativistic effects* (فقرة *4.14.1*).
تعالج هذه القياسات بعدها بواسطة برامج التصفية والتنبؤ (مثلا *Kalman Filter*) ومن ثمّ تستخدم لحساب ما يلي:

- ست عناصر مدار لكل قمر
- ثلاث وسائط ساعية لكل قمر
- ثلاث عوامل ضغط إشعاع شمسي *solar radiation pressure* لكل قمر
- وسيطين ساعيين لكل محطة مراقبة (إحدى الساعات تعتبر صحيحة خالية من الخطأ)
- عامل مقياس ناتج عن تأثير طبقة التروبوسفير *Troposphere* الجوية لكل محطة مراقبة
- ثلاث وسائط لحركة القطب.

تستخدم التشويشات *perturbations* المقدّرة لتلك العناصر لتصحيح التقويمات المرجعية للأقمار ولتشكيل التقويمات المبثوثة. يتمّ التنبؤ بطريقة مشابهة بتصرّف ساعة القمر ويرسل هذا ضمن إشارة المعلومات على شكل كثير حدود من المرتبة الثانية. يعتمد حساب مدارات الأقمار على وسائط حقل الثقالة وإحداثيات المحطات في الجملة الجيوديزية العالمية *World Geodetic System WGS 1984*. تؤخذ وسائط دوران الأرض من مؤسسات علمية دولية مثل الخدمة الدولية لدوران الأرض *International Earth Rotation Service IERS* (فقرة *4.5.2*، *4.14.3*)

4.5.2 **تقدمة المدار** *Orbit Representation*

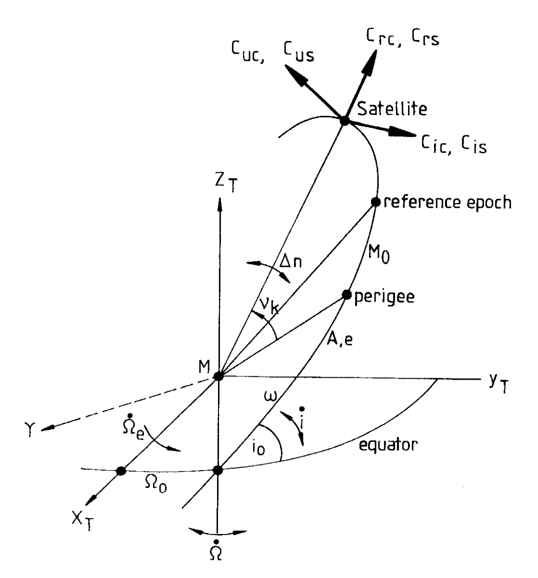
تتجسد إحداثيات الأقمار المحسوبة عن طريق البرامج المذكورة أعلاه (*kalman filter*) بعناصر كيبلر (فقرة *3.1.1*) ووسائط تصحيحية لها (فقرة *3.2*). تبين اللائحة *4.3* وسائط مدار القمر وحالة ساعته. الوسائط المذكورة تعود لنقطة زمنية مرجعية t_{0e} للتقويمات ونقطة زمنية مرجعية t_{0c} من أجل الساعة. تلك الوسائط صالحة لفترة زمنية تبلغ ساعتين قبل وساعتين بعد النقطة الزمنية المرجعية. الشكل *4.9* يوضح العناصر المحتواة في تلك التقويمات.

الوسائط الزمنية
t_{0e}: زمن مرجعي، وسائط التقويمات [ثانية]
t_{0c}: زمن مرجعي، وسائط الساعة [ثانية]
a_0, a_1, a_2: عوامل كثير حدود لتصحيحات الساعة [ثانية]
IOD: نسخة المعلومات، رقم لتعريف دفعة مجموعة المعلومات الراهنة
وسائط كيبلر للمدار *Keplerian parameter*:
$\sqrt{A}$: الجذر التربيعي لنصف المحور الكبير لمدار القمر [$m^{1/2}$]
e: لامركزية المدار [دون واحدة]
i_0: زاوية الإرتفاع *inclination* في اللحظة الزمنية المرجعية [نصف دائرة]
Ω_0: زاوية الصعود المستقيم لعقدة الصعود *right ascension of ascending node* في اللحظة الزمنية المرجعية [نصف دائرة]
ω: متحول نقطة الحضيض *argument of perigee* للمدار [نصف دائرة]
$\overline{M_0}$: الإنحراف الوسطي في اللحظة الزمنية المرجعية [نصف دائرة]
وسائط التصحيحات *Perturbation parameter* (فقرة *3.2.2*)
Δn : الفرق بين الحركة الوسطية للقمر والقيمة المحسوبة [نصف دائرة]
$\dot{\Omega}$: درجة تغيّر الصعود المستقيم [نصف دائرة/ثانية]
$\dot{i}$: درجة تغيّر زاوية الإرتفاع [نصف دائرة/ثانية]
C_{us}: مطال تصحيح الحد الجيبي التوافقي *sine harmonic* لمتحول زاوية العرض *argument of latitude* [راديان]
C_{uc}: مطال تصحيح حد التجيب التوافقي *cosine harmonic* لمتحول زاوية العرض *argument of latitude* [راديان]
C_{is}: مطال تصحيح الحد الجيبي التوافقي *sine harmonic* لمتحول زاوية الإرتفاع *argument of inclination* [راديان]
C_{ic}: مطال تصحيح حد التجيب التوافقي *cosine harmonic* لمتحول زاوية الإرتفاع *argument of inclination* [راديان]
C_{rs}: مطال تصحيح الحد الجيبي التوافقي *sine harmonic* لنصف قطر المدار [متر]
C_{rc}: مطال تصحيح حد التجيب التوافقي *cosine harmonic* لنصف قطر المدار [متر]

اللائحة *4.3*: عرض للتقويمات المبثوثة.

يتم، كل *60* دقيقة، إرسال مجموعة جديدة من المعطيات مسببة بذلك قفزات بين الأقسام المتداخلة. هذه الفروقات يمكن أن تصل إلى ديسيمترات قليلة، ولكن يمكن معالجتها بطرق مناسبة. تكون هذه القفزات أكبر في حال تم حساب التقويمات من معطيات مختلفة، لذلك ينصح بإستخدام أحدث تقويمات يمكن الحصول عليها.

تستخدم مجموعة الوسائط المذكورة في الجدول *4.3* لحساب زمن القمر وإحداثياته. الواحدة المسماة (نصف دائرة *semicircle*) يمكن تحويلها إلى راديان بضربها بقيمة π. المجموعة الأولى من الوسائط المذكورة تستعمل لتصحيح ساعة القمر، والمجموعة الثانية تعرّف إهليلج كيبلر في اللحظة المرجعية. المجموعة الثالثة تحوي تسعة وسائط تصحيحية متعلقة بتأثير جاذبية القمر والشمس وضغط الإشعاع الشمسي، وكذلك تأثير حركة القطب (فقرة *3.2*).



شكل *4.9*: وسائط كيبلر والتصحيحات المرسلة في التقويمات *broadcast message*.

يبين الشكل *4.9* وسائط كيبلر وعناصر التصحيحات في المعلومات المبثوثة *broadcast message*. الوسيط Ω_0 ليس مقاسا إعتبارا من نقطة الإعتدال الربيعي Υ، إنما إعتبارا من خط الزوال المرجعي X_T. لذلك فإن Ω_0 لاتمثل هنا زاوية صعود مستقيم، إنما زاوية طول.

4.5.3 حساب زمن القمر الصناعي وإحداثياته *Computation of Satellite Time and Satellite Coordinates*

يتم تمييز زمن ال *GPS* برقم الأسبوع ورقم الثواني الجارية منذ بداية الأسبوع المعتبر. لذلك يمكن أن يتراوح الزمن بين *0* في بداية الأسبوع و *604800* عند نهاية الأسبوع. إن الزمن الصفري للنظام هو نقطة بداية إعتماده، وهو يوم *5* كانون الثاني عام *1980* تمام الساعة 0^h *UTC* في مقياس الزمن الدولي (فقرة *2.2.4*). إن زمن ال *GPS* هو مقياس زمني مستمر ومعرّف بواسطة الساعة في محطة التحكم الرئيسية *MCS* (فقرة *4.3*). يجري في كل سنة تعديل مقياس الزمن الدولي *UTC* وذلك بإضافة ثانية واحدة له، ومن ناحية أخرى فإن ساعة محطة التحكم الرئيسية *MCS* لها إنحرافات دقة خاصة بها، لذلك فهذين المقياسين للزمن غير متطابقين. يتم مراقبة الفرق بين المقياسين الزمنيين بإستمرار من قبل قسم التحكم وكذلك إرساله للمستخدمين عن طريق المعلومات الملاحية. على سبيل المثال بلغ الفرق بين النظامين الزمنيين عام *1995* مقدار *10* ثواني (زمن نظام *GPS* مسبّق).

بسبب وجود أخطاء توليد الترددات الثابتة من قبل مولدات الترددات *oscillators* فإن قراءة ساعة القمر تختلف عن زمن النظام *GPS*. يتم التحكم بتصرّف ساعة القمر (*oscillator*) عن طريق قسم التحكم بواسطة التنبؤ به ككثير حدود من الدرجة الثانية، وسائطه موجودة في المجموعة الأولى من اللائحة *4.3*. يتم تصحيح زمن القمر t_{SV} بالنسبة لزمن ال *GPS*:

$$t = t_{SV} - \Delta t_{SV}$$

حيث

$$\Delta t_{SV} = a_0 + a_0(t - t_{0c}) + a_2(t - t_{0c})^2 \qquad 4.3$$

t_{0c}: الزمن المرجعي للعوامل a_0،a_1،a_2.

يمكن في الحسابات اللاحقة تعويض t بقيمة t_{SV} وذلك بدون خسارة بالدقة. بإشتقاق العلاقة نحصل على إنحراف ساعة القمر الصناعي *drift of satellite clock*:

$$\dot{\Delta} t_{SV} = a_1 + 2a_2(t - t_{0c}) \qquad 4.4$$

تحسب إحداثيات القمر الصناعي X_k ,Y_k ,Z_k من أجل نقطة زمنية معينة t وذلك في إطار مرجعي جيومركزي مثبت بالأرض. الزمن t_k المنقضي منذ النقطة الزمنية المرجعية t_{0e} يساوي:

$$t_k = t - t_{0e} \qquad 4.5$$

يجب أخذ حالة عبور بداية إسبوع جديد بعين الإعتبار. وكذلك تصح العلاقات التالية:

نصف المحور الكبير لمدار القمر　$$A = \left(\sqrt{A}\right)^2 \qquad 4.6$$

الحركة الوسطية المحسوبة　$$n_0 = \sqrt{\frac{GM}{A^3}} \qquad 4.7$$

الحركة الوسطية المصححة　$$n = n_0 + \Delta n \qquad 4.8$$

الإنحراف الوسطي　$$\overline{M_k} = \overline{M_0} + n.t_k \qquad 4.9$$

معادلة كيبلر للإنحراف الوسطي　$$E_k = \overline{M_k} + e.\sin\ E_k \qquad 4.10$$

تحلّ هذه المعادلة بالتقريب المتتالي. يكفي عادة تقريبين لأن لامركزية المدار صغيرة ($e \le 0.001$):

$$E_0 = \overline{M} \qquad E_i = \overline{M} + e.\sin\ E_{i-1}. \qquad 4.11$$

الثابتة الثقالية في جملة *WGS84*:

$$GM = 3{,}986005\ .\ 10^{14}\ m^3/s^2. \qquad 4.12$$

وسرعة دوران الأرض في جملة *WGS84*:

$$\omega_e = 7{,}292115.10^{-5}\ rad\ /\ s \qquad 4.13$$

تستخدم العلاقات التالية في الحسابات اللاحقة للإحداثيات

الإنحراف الحقيقي　$$\cos v_k = \frac{\cos\ E_k - e}{1 - e.\cos\ E_k} \qquad 4.14$$

$$\sin v_k = \frac{\sqrt{1-e^2}\ \sin\ E_k}{1 - e.\cos\ E_k}$$

دليل زاوية العرض　$$\Omega_k = v_k + \omega \qquad 4.15$$

تصحيح زاوية العرض　$$\delta u_k = C_{uc}\cos\ 2\Phi_k + C_{us}\ \sin\ 2\Phi_k \qquad 4.16$$

تصحيح القطر　$$\delta r_k = C_{rc}\ \cos\ 2\Phi_k + C_{rs}\sin\ 2\Phi_k \qquad 4.17$$

تصحيح زاوية الإرتفاع　$$\delta i_k = C_{ic}\ \cos\ 2\Phi_k + C_{is}\ \sin\ 2\Phi_k \qquad 4.18$$

الدليل المصحح　$$U_k = \Phi_k + \delta u_k \qquad 4.19$$

القطر المصحح　$$r_k = A(1 - e\cos E_k) + \delta r_k \qquad 4.20$$

زاوية الإرتفاع المصححة　$$i_k = i_0 + \dot{i}\,t_k + \delta i_k \qquad 4.21$$

الإحداثيات في مستوي المدار　$$X_k' = r_k\cos u_k \quad Y_k' = r_k\sin u_k \qquad 4.22$$

زاوية الطول المصححة للصعود المستقيم　$$\Omega_k = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_e).t_k - \dot{\Omega}_e.t_{0e} \qquad 4.23$$

إحداثيات القمر الجيومركزية

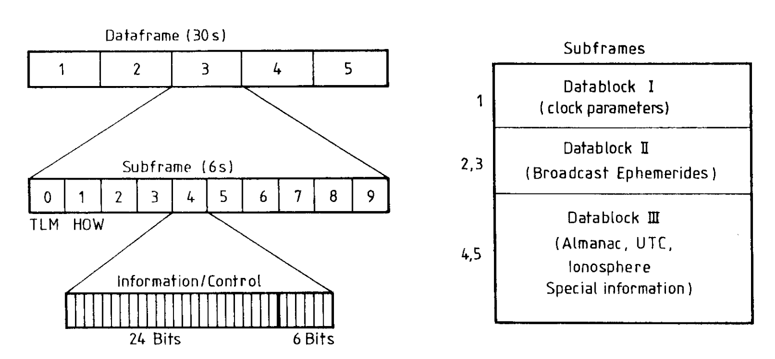
$$X_k = X_k'\cos\Omega_k - Y_k'\sin\Omega_k\cos_k$$

$$Y_k = X_k'\sin\Omega_k + Y_k'\cos\Omega_k\cos i_k \qquad 4.24$$

$$Z_k = Y_k'\sin i_k$$

4.5.4 تكوين إشارة المعلومات الملاحية *Structure of the GPS Navigation Data*

وتدعى أيضا بالخبر الملاحي وهو مركّب كما في الشكل *4.10*. على المستخدم أن يحلّ شيفرة إشارة المعلومات ليمكنه الدخول إلى المعلومات الملاحية. للأغراض الملاحية الآنيّة *on-line*، يتم حل هذه الشيفرة بواسطة معالج *processor* (كومبيوتر) داخل الجهاز. يؤمّن أغلب منتجي اللواقط برامجا لحل الشيفرات في المكتب بعد نقل القياسات من اللاقط إلى الكومبيوتر.



شكل *4.10*: تكوين إشارة المعلومات الملاحية *Structure of the GPS Navigation Data*.

بتردده البطيء (*50 bit/sec*) وتكراره لنفسه كل *30* ثانية فإن محتوى المعلومات الملاحية كاملا يساوي *(50x30=1500 bit)*. إن إطار المعطيات الكامل مقسّم إلى خمس إطارات ثانوية ذات فترة *(30/5=6)* ثواني (كل واحدة توافق *(1500/5=300 bits*)، كل إطار ثانوي يحتوي على عشرة كلمات، الواحدة منها تشكّل من *30 bits*، ستة من تلك الثلاثين *bit* هي للتدقيق (شكل *4.10*). الكلمتين الأوليتين من كل إطار ثانوي هما كلمة الإرسال *telemetry word TLM* والكلمة الأولى *HOW Hand Over Word* لشيفرتي *C/A-P-Code*. كلمة الإرسال *TLM* تحوي طريقة (تزامن *synchronization pattern*) لتسهيل الدخول الى المعطيات الملاحية.

توزّع المعلومات على ثلاث مجموعات كالتالي:

المجموعة الأولى: تظهر بالإطار الأول وتحوي وسائط الساعة،

المجموعة الثانية: تظهر في الإطارين الثاني والثالث وتحوي الوسائط اللازمة لحساب إحداثيات القمر،

المجموعة الثالثة: تظهر في الإطارين الرابع والخامس وتحوي التقويمات ووسائط الساعات لكلّ أقمار النظام، كما تحوي أيضا وسائط تصحيحات طبقة الإيونوسفير *ionosphere*...إلخ .

خلافا للإطارين الأول والثاني فإن الإطارين الرابع والخامس لايتكرّران كلّ *30* ثانية. الإطاران يتألفان من *25* صفحة تظهر بالتتابع بحيث أن محتوى المعلومات يبثّ كاملا خلال *12,5* دقيقة *(25x30s/60)*. كلّ صفحة تحوي حالة قمر واحد من أقمار النظام (تقويماته الخاصة به، تصحيحات ساعته،رمزه الخاص به، حالة صحته اللحظية *health status*). هذه المعلومات القليلة الدقة تفيد لإلقاء نظرة على توزّع الأقمار في المجموعة وفحص الإشارات الملاحية للأقمار.

4.6 الحد من دقة النظام International Limitation of the System Accuracy

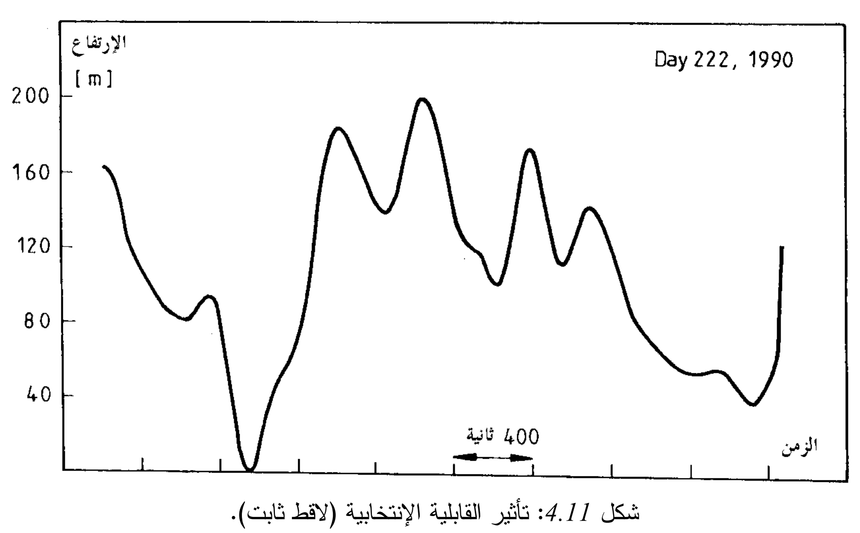
إن نظام التوضع العالمي *GPS* هو نظام ملاحي عسكري تحت مسؤولية قسم الدفاع الأمريكي *U.S. Departement of Defence DoD*، وبناء عليه يجب أن يحقق أغراضا أمنية أمريكية. لذلك فقد أعلن منذ البداية بأن المستخدمين المدنيين للنظام سوف يتمتعون فقط بدقة محدودة للنظام. الخدمة المهيأة للمستخدمين المدنيين تدعى خدمة التوضع النظامية *Standard Positioning Service SPS*، بينما الخدمة المهيأة للمستخدمين أصحاب الترخيص (غالبا العسكريين) تدعى خدمة التوضع الدقيقة *Precise Positioning Service PPS*. تبلغ دقة التوضع المعياري حاليا *100 m 2D rms*، وهذا يعني دقّة موضع أفقية (أو ثنائية الأبعاد) هي مائة متر أو أفضل لمستعمل وحيد وذلك *95%* من الزمن (فقرة *4.14.2*). الخدمة الدقيقة تؤمن *10-20 m* (بأبعاد ثلاث).

هناك طريقتين لتحقيق تحديد الدقة المذكور *limitation of accuracy*، وهما طريقة تدعى ضد التشويش *Anti Spoofing AS* وطريقة تدعى قابلية الإنتخاب *Selective Availability SA*. الطريقة الأولى تتضمن تشويش مقصود للشيفرة الدقيقة *P-Code* حيث تسمى عندها الشيفرة المحمية *Y-Code*. يزوّد المستعملون أصحاب الترخيص فقط بوسيلة الدخول إلى الشيفرة الدقيقة. طريقة القابلية الإنتخابية *SA* تتضمن شقّين للحد من المعطيات:

– تغيير معطيات التقويمات

– العمل على عدم توازن ساعة القمر.

كلا الطريقتان تنتجان أخطاء في أشباه الأطوال المقاسة. الشكل *4.11* يبين أن الحد من الدقة بواسطة القابلية الإنتخابية *SA* يتضمن مركبات متغيرة ببطء وبسرعة.



شكل *4.11*: تأثير القابلية الإنتخابية (لاقط ثابت).

تم تشغيل *SA* لأول مرة يوم *23* آذار *1990* ولكن توقف العمل به بتاريخ *2* آب *1990* بسبب أزمة الخليج الثانية. ودخلت الطريقة الخدمة المنتظمة إعتبارا من تشرين الثاني *1991*. بدأ العمل بطريقة ضد التشويش *AS* رسميا منذ إعلان حالة التشغيل الكاملة للنظام يوم *1* كانون الثاني *1994* (*21* قمر من النمط *II* متواجدون في مداراتهم).

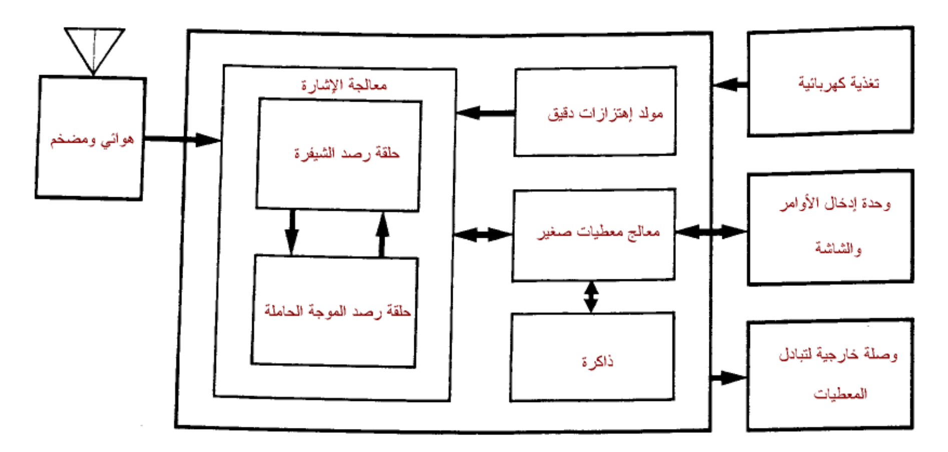
يمثل توزّع الأقمار الحالي المرحلة النهائية من تشكّل المجموعة الهندسي والتي تتكون من *24* قمرا في *6* مستويات تؤمّن تغطية ثلاثية الأبعاد بدون مناطق دقة منخفضة في العالم. يمكن الحصول على معلومات عن حالة النظام من مصادر مختلفة عامة وتجارية. حرس الشواطئ الأمريكي مثلا *U.S. Coast Gaurd* مسؤول عن وضع هذه المعلومات تحت تصرف المستخدمين المدنيين.

4.7 لواقط نظام ال GPS (قسم المستخدم)

إن نظام ال *GPS* هو حديث، لذلك فإن لواقط إشاراته تتطور بسرعة. في هذه الفقرة سوف يتم شرح المبدأ الرئيسي لتصميم اللاقط، وبعدها يتم عرض بعض نماذج اللواقط الكثيرة المتواجدة في الأسواق للأغراض الجيوديزية والمساحية والملاحية.

4.7.1 **مفاهيم اللاقط ومركباته الأساسية** *Receiver Concepts and Receiver Components*

المركّبات الأساسية للاقط ال *GPS* (شكل *4.12*):



شكل *4.12*: المركبات الأساسية للاقط.

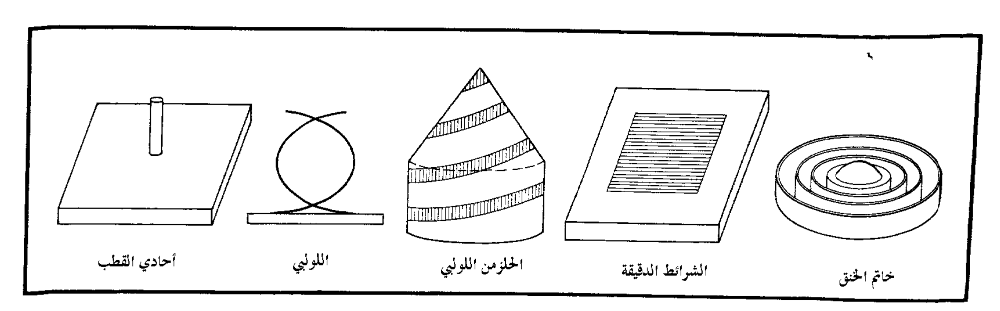
- هوائي مع مضخّم إشارة
- وحدة التردّد الراديوي مع التعرّف على الإشارة ومعالجتها (القنوات)
- مولّد تردّدات دقيق (ساعة ذرية)
- وحدة تأمين طاقة (كهربائية)
- وحدة تدخّل المستخدم (إعطاء أوامر وشاشة)
- وحدة ذاكرة وتخزين القياسات.

يكتشف الهوائي الموجة الإلكترومغناطيسية الواصلة من القمر الصناعي، يحوّل طاقة الإشارة إلى تيار كهربائي، يضخّم قوة الإشارة ويوصلها إلى القسم الإلكتروني للاقط (وحدة التردد الراديوي). يجب أن يكون الهوائي حساس جدا لإشارات القمر الضعيفة، ويجب أن تؤمّن طريقة الإلتقاط إلتقاطا لإشارات من كلّ الإتجاهات الممكنة في نصف الكرة السماوية المرئي (مختلف زوايا السموت والإرتفاعات). متطلبات إضافية للّواقط المستعملة لأغراض جيوديزية دقيقة هي توازن وثبات عالي لمركز الطورالكهربائي *antenna phase center* في الهوائي (فقرة *4.14.5*)، وحماية ضد ظاهرة تعدد طرق الإشارة الملتقطة *mulipath* (فقرة *4.14.4.3*). يطلب في التطبيقات الملاحية (جوية وبحرية) إلتقاط الموجات القادمة من مستو أدنى من المستوي الأفقي للهوائي، بينما يتم في التطبيقات الجيوديزية، في أغلب الأحيان، إهمال الإشارات ذات الإرتفاع الأقل من *10* درجات.

هناك عدة أنواع من هوائيات اللواقط المتوفرة في الأسواق (شكل *4.13*):

- ذو القطب الواحد أو ثنائي القطب *monopole or dipole*
- الحلزون التربيعي *quadrifilar*
- الحلزون اللولبي *spiral helix*
- الشرائط الدقيقة *microstrip*
- خاتم الخنق *choke ring* (مصمّم لتجنّب ظاهرة تعدد طرق الإشارة *mulipath*)

يستعمل نموذج الشرائط الدقيقة *microstrip* بشكل واسع لسهولة صناعته ويمتاز بقلّة سماكته ليجد إستعمالا أكبر في التطبيقات الجوية (سهولة تركيبه في الطائرات) وكذلك يتوافق مع المتطلبات المتزايدة للحصول على أجهزة *GPS* صغيرة الحجم، وبشكل خاص عندما يكون الهوائي واللاقط مبنيان بنفس الوحدة. الهوائيات الجيوديزية (المستعملة في التطبيقات الجيوديزية) تصمّم لإستقبال الترددين الحاملين L_1, L_2. يتم حمايتهم من ظاهرة تعدد طرق الإشارة *mulipath* بواسطة صفيحة إضافية أو بإستعمال (خاتم الخنق *choke ring*).



شكل *4.13*: نماذج هوائيات لواقط نظام ال *GPS*.

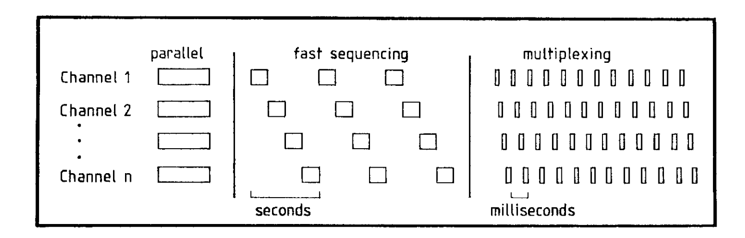
تحوّل إشارة القمر الواصلة إلى تردد منخفض في وحدة التردد الراديوي *Radio Frequency* وتعالج خلال قناة أو عدة قنوات. يمكن إعتبار قناة اللاقط الوحدة الإلكترونية الرئيسية في اللاقط. سوف يتم شرح معالجة الإشارة في الفقرة *4.7.2*.

يمكن أن يملك اللاقط قناة واحدة أو عدّة قنوات. في طريقة تصميم القنوات المتوازية *parallel channel concept* ترصد كلّ قناة قمرا صناعيا معينا. لتعيين ثلاث مركبات إحداثية وزمن، يجب أن يتوفر على الأقل أربع قنوات متوازية. بإستخدام قنوات إضافية يتمّ رصد أقمار إضافية. اللواقط الحديثة تحوي *12* قناة لكلّ تردّد.

في طريقة تصميم القناة التبادلية *sequencing channel* تبدّل القناة من قمر لآخر بفاصل زمني منتظم. لاقط ذو قناة واحدة يجب أن يبدّل على الأقل لأربعة أقمار لتعيين ثلاثة إحداثيات (ثلاثية الأبعاد). يجب أن يتزامن تردّد عملية التبديل *sequencing rate* مع تردّد إشارة المعطيات *data rate*، ولذلك فإنّ إشارة المعلومات لا يتمّ إلتقاطها بشكل كامل إلا بعد عدة تبديلات. يحتاج اللاقط أربعة مرات *30* ثانية على الأقل قبل أن يتم الحصول على أوّل موقع للاقط. تملك بعض نماذج اللواقط قناة خاصة لإستقبال وقراءة إشارة المعلومات (فقرة *4.5.4*). في أغلب الحالات يبلغ تردّد التغيير، في قنوات التغيير السريع *fast sequencing channels*، *1* ثانية لكل قمر. تستطيع القنوات عادة أن تحصل على طور الموجة الحاملة *carrier phase* عندما تعود لرصد القمر نفسه. يمكن أن توجد صعوبات في هذا المجال في التطبيقات الحركية *kinematic* وبشكل خاص بتسارعات عالية.

طريقة أخرى لمعالجة الإشارة هي طريقة الإستقبال المتعدّد المتقابل *multiplex*. هنا تبدّل قناة اللاقط بين أقمار مختلفة بسرعة عالية، وفي بعض الحالات لكلا الترددين. تكون نسبة تكرار التبديل *switching rate* متزامنة مع المعلومة الملاحية، أي *50 bit* في الثانية أو *20* ميللي ثانية لكل *bit*. مجموعة كاملة بأربعة أقمار تنتهي بعد *20* ميللي ثانية، أو بعد *40* ميللي ثانية من أجل اللواقط ذات الترددين (مثلا *TI4100*). يتمّ إستقبال المعلومة الملاحية بشكل متواصل، لذلك فإن أول قيمة لموقع اللاقط تحسب بعد *30* ثانية. تكون قياسات طور الموجة الحاملة متواصلة حتى في تسارعات عالية. تستعمل، بشكل جوهري، قناة وحيدة للحصول على قياسات شبه متزامنة لكلّ الأقمار. إحدى فوائد طريقة الإستقبال المتعدّد المتقابل *multiplex*، بالمقارنة مع طريقة القنوات المتوازية *parallel channel concept*، أنّ زمن التأخير المتعلق بأجهزة اللاقط *interchannel biases* لايلعب دورا.

إنّ القنوات المتوازية للرّصد المتواصل أرخص، وتعطي إمكانية أكبر للاقط، حيث أنها تؤمّن حساسية كبيرة للإشارة وتدعم الحصول على قياسات شيفرة *Code* مفلترة *smoothed* بمساعدة الموجة الحاملة. نظرا للإنخفاض السريع للأسعار فإنّ تركيب اللواقط في المستقبل سوف يستند بشكل أساسي على طريقة القنوات المتعددة. الشكل *4.14* يبيّن نظرة عامة على التصميمات المختلفة لإنشاء القنوات.



شكل *4.14*: تصميمات مختلفة لقنوات لاقط ال *GPS*.

المعالج الدقيق *microprocessor* ضروري لقيادة عملية الإستقبال في اللاقط، متضمّنا إستقبال الإشارة، معالجتها، وفكّ شيفرة المعلومات المبثوثة. إمكانيات إضافية للمعالج الدقيق هي الحساب الفوري *on line* للمواضع والسرعات، وتحويلها إلى جملة محلية، أو تعيين معلومات لنقاط الطريق *waypoint* (في الملاحة).

مولّد الترددات *oscillator* يولّد التردّد المرجعي في اللاقط (فقرة *2.2.5*). يكفي بشكل عام مولد ترددات عادي ورخيص نسبيا (من الكوارتز) لأن معلومات الساعة الدقيقة يتم الحصول عليها من القمر، وكذلك أخطاء ساعة المستعمل (اللواقط) تحذف بعمليات الطرح بين القياسات عندما تكون كل القياسات، في اللواقط المشاركة بحملة القياسات، متزامنة (مسجلة بنفس النقطة الزمنية). في حالة الملاحة بوجود قمرين أو ثلاثة فقط فيلزم هنا مولّد ترددات خارجي (بشكل عام فإن مولد ترددات دقيق جدا، من الروبيديوم مثلا *rubidium frequency standard*، يمكن أن يقوم مقام قمر صناعي في عملية الحل). تسمح بعض أنواع اللواقط بإستعمال مولّد ترددات مستقل يمكن وصله إليها.

كانت التغذية الكهربائية للّواقط تشكّل مشكلة كبيرة في الأجيال المبكّرة من اللواقط. حاليا تصمّم اللواقط لإستهلاك كهربائي طفيف قدر الإمكان. تحوي أغلب اللواقط على بطاريات داخلية قابلة للشحن إضافة إلى إمكانية التغذية الكهربائية الخارجية. تكفي البطارية الداخلية للعمل لفترة يمكن أن تصل لغاية أسبوع كامل وذلك حسب تواتر تسجيل القياسات المرغوب *observation rate*.

من أجل المعالجة اللاحقة للمعطيات يجب أن تخزّن القياسات والمعطيات الملتقطة في ذاكرة داخلية أو خارجية. المعالجة اللاحقة للمعطيات ضرورية في حالات القياسات على عدة محطات في حملة قياسات واحدة (التطبيقات الجيوديزية والمساحية). يتم تسجيل كل من أشباه المسافات، حالة الطور، المعلومات الملاحية والزمنية. يمكن أن تكون كمية المعطيات المسجّلة كبيرة وذلك حسب تواتر التسجيل المبرمج من قبل المستعمل. بوجود ستة أقمار، على سبيل المثال، وبإعتبار تواتر التسجيل *1* ثانية (كل ثانية يتم تسجيل مجموعة من المعطيات) نحصل على كمية معطيات مسجلة بمقدار *1.5 Mbyte* بالساعة في لاقط ذو ترددين. تحوي بعض اللواقط الحديثة ذواكر داخلية ذات سعة *5 Mb* أو أكثر. وبعض اللواقط تخزّن القياسات على شريط مغناطيسي. كما يمكن بشكل عام تسجيل القياسات مباشرة إلى كومبيوتر صغير *laptop* (القرص الثابت أو المتحرك) موصول إلى اللاقط أثناء القياسات بوصلة من نموذج *RS 232* أو ما يعادلها.

تحوي أكثر اللواقط الحديثة لوحة مفاتيح وشاشة صغيرة لتأمين الإتصال المتبادل بين المستخدم واللاقط. تستخدم لوحة المفاتيح لإدخال أوامر، ومعطيات خارجية مثل رقم محطة قياس وإرتفاع الهوائي عن إشارة الرصد المعتمدة أو لإختيار أوامر مسبقة مقترحة من الجهاز. تظهر الشاشة إحداثيات محسوبة، أقمار مرئية، دلائل على نوعية القياسات ومعلومات أخرى. تطورت برامج التشغيل بسرعة وصارت حاليا سهلة الإستعمال *user friendly* حيث تقود المستخدم عبر إختيارات مختلفة على مدار البرنامج.

يمكن تصنيف لواقط نظام ال *GPS* لعدة أنواع حسب مقاييس مختلفة:

– لواقط مرتبطة بالشيفرة *code dependent receivers*

– لواقط بدون شيفرة *code-free receivers*

كلا الطريقتين موجودتان حاليا في اللواقط الحديثة.

تصنّف أيضا اللواقط على أساس نوع القياسات الممكن الحصول عليها:

– شيفرة نظامية *C/A-code*

– شيفرة نظامية *C/A-code* + طور الموجة الأولى L_1

– شيفرة نظامية *C/A-code* + طور الموجة الأولى L_1 + طور الموجة الثانية L_2

– طور الموجة الأولى L_1 (نادرة الإستعمال)

– طور الموجتين الأولى والثانية L_1,L_2 (نادرة الإستعمال)

تصنيف آخر حسب إنشاء لقنوات اللاقط:

– لواقط متعددة القنوات *multi channel receivers*

– لواقط تبديلية *sequential receivers*

– لواقط ذات الإستقبال المتعدّد المتقابل *multiplexing receivers*

وأخيرا هناك تصنيف حسب المستخدمين:

– لواقط عسكرية *military receivers*

– لواقط مدنية *civilian receivers*

– لواقط ملاحية *navigation receivers*

– لواقط زمنية *time receivers*

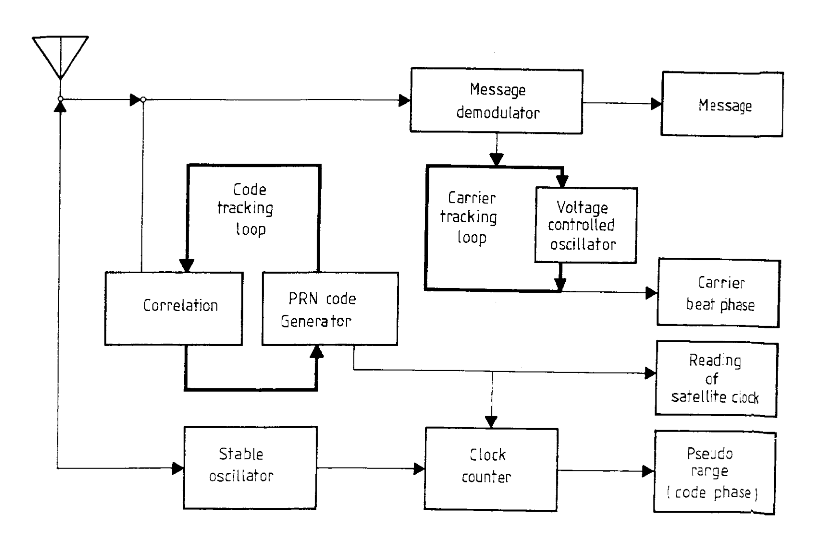
– لواقط جيوديزية *geodetic receivers*.

من الأمور الجوهرية في التطبيقات الجيوديزية هي إستخدام قياسات أطوار الموجات الحاملة *carrier phases* للترددين معا وإمكانية الدخول إلى الشيفرة الدقيقة (على الأقل من أجل المسافات الكبيرة أو في المناطق الجغرافية ذات التغيرات الإيونوسفيرية *ionospheric disturbances* العالية، أي زوايا العرض الجغرافي العليا والدنيا، *4.14.4.1*).

4.7.2 **معالجة الإشارة المتعلقة بالشيفرة** *Code Dependent Signal Processing*

إن شبه المسافة المشتقّ من قياسات الشيفرة هو القياس الأساسي في قناة اللاقط المرتبط بالشيفرة. تتمّ مقارنة موضع الطور لجزء الشيفرة الملتقطة مع طور نسخة موافقة لهذا الجزء. يتمّ توليد هذه النسخة داخل اللاقط. تتمّ المقارنة بواسطة طريقة الإرتباط *correlation technique*. لذلك يمكن أن يدعى القياس بطور الشيفرة *code phse*. يجب أن يملك الراصد معرفة مبدئية مسبقة للشيفرة، هذا يعني أن الشيفرة يجب أن تولّد داخل قناة اللاقط بإستخدام نفس الطريقة المستخدمة في القمر الصناعي. تتمّ عملية الإرتباط بين جزئي الشيفرتين الملتقطة والمولّدة في الجهاز (فقرة *4.4*).

تحدث هذه العملية في واحدة من حلقات الرصد في اللاقط وهي حلقة رصد الشيفرة *code tracking loop* (شكل *4.15*). الزمن اللازم لتوافق جزئي الشيفرة مع بعضهما (التأخير الزمني *time delay*) يوافق زمن إنتشار الإشارة من القمر إلى اللاقط. إن جزء الشيفرة هو بشكل أساسي تابع للزمن، لذلك فهو يؤمّن لنا قراءة ساعة القمر لحظة مغادرته القمر (في النقطة الزمنية التي غادرت بها *bit* معينة القمر، يمكن إعتبار ال *bit* كقفزة من *-1* إلى *+1* أو من *0* إلى *1* أو العكس). يحوّل التأخير الزمني إلى مسافة بإستعمال سرعة إنتشار الضوء (سرعة إنتشار الموجات الإلكترومغناطيسية في الفراغ، علاقة *2.69*). تشتقّ أشباه الأطوال إما من الشيفرة الدقيقة أو النظامية.



شكل *4.15*: تصميم مبسط لقناة ترابط الشيفرة *Code correlation channel*.

الحلقة الأخرى في مرحلة معالجة الإشارة هي حلقة رصد الموجة الحاملة *carrier tracking loop*. هنا يتم فصل الشيفرة عن الموجة الحاملة ليصبح بالإمكان قياس الأطوار، كما يتم إستخلاص المعلومات المحمّلة على الإشارة. تدعى هذه الطريقة أيضا إعادة إنشاء الموجة الحاملة *reconstruction of the carrier*. في تلك الحلقة يتم مقارنة إشارة طور الموجة الحاملة المحلّلة القادمة من القمر مع إشارة طور مولّد الترددات في اللاقط. القيمة المقاسة هي فرق الطور للموجة الحاملة *carrier beat phase* (الطور النسبي بين الإشارة الحاملة الملتقطة والإشارة الحاملة المولدة داخليا بواسطة مولد الترددات في اللاقط).

إن قناة إرتباط كاملة متعلقة بالشيفرة تنتج انواع القياسات التالية:

- طور الشيفرة *Code phase*
- طور الموجة الحاملة *Carrier phase*
- تغيّر طور الموجة الحاملة (تردد دوبلر *Doppler frequency*)
- إشارة المعلومات *Satellite message*.

إن طريقة الإرتباط *correlation technique* وطريقة إعادة إنشاء الموجة الحاملة *reconstruction of the carrier* تعملان فقط على التردد الثاني L_2 في حال كون الشيفرة الدقيقة موجودة (*AS* غير فعّالة)، أو لدى مستعملين أصحاب ترخيص للدخول إلى الشيفرة الجديدة *Y-Code* (فقرة *4.6*).

4.7.3 معالجة الإشارة بدون شيفرة *Code-less Signal Processing*

هنا تستخرج قنوات اللاقط إشارة القمر الصناعي دون معرفة الشيفرة. الفائدة من هذا التصميم هو عدم التأثر بعمليات ترميز الشيفرة من قبل قسم التحكم بالنظام في المستقبل (فقرة *4.6*). ولكن بالمقابل لايمكن إستخلاص التقويمات المبثوثة ولا المعلومات الملاحية ولا معلومات دقيقة عن الزمن. ولذلك يحتاج المرء عندئذ إلى مصادر أخرى للتمكّن بالقيام بالتخطيط المسبق لمهمات القياسات ومعالجة المعطيات. ويجب أن تتم عملية تزامن اللواقط عديمة الشيفرة المشاركة في القياسات قبل البدء بالقياس.

لقد ضمنت الحكومة الأمريكية الشيفرة النظامية لكل المستخدمين المدنيين (طبعا تحت تأثير قابلية الإنتخاب *SA*)، لذلك فقد توقف إنتاج اللواقط عديمة الشيفرة حاليا. تبقى الطريقة مهمة للمنتجين للدخول إلى الإشارة الثانية بعد ترميز (حماية) الشيفرة الدقيقة.

تدعى الطريقة المتّبعة في اللواقط عديمة الشيفرة بطريقة الجداء أو التربيع *squaring technique*. قناة التربيع تضرب إشارة القمر القادمة بنفسها وتنتج نسخة أخرى موافقة للموجة الحاملة الأصلية (شكل *4.16*). الشيفرة والمعلومات المبثوثة تسقط خارجا خلال هذه العملية. إن جداء قسم الشيفرة في المعادلة *4.2*

$$x = P(t)\sin(\omega t) \qquad 4.25$$

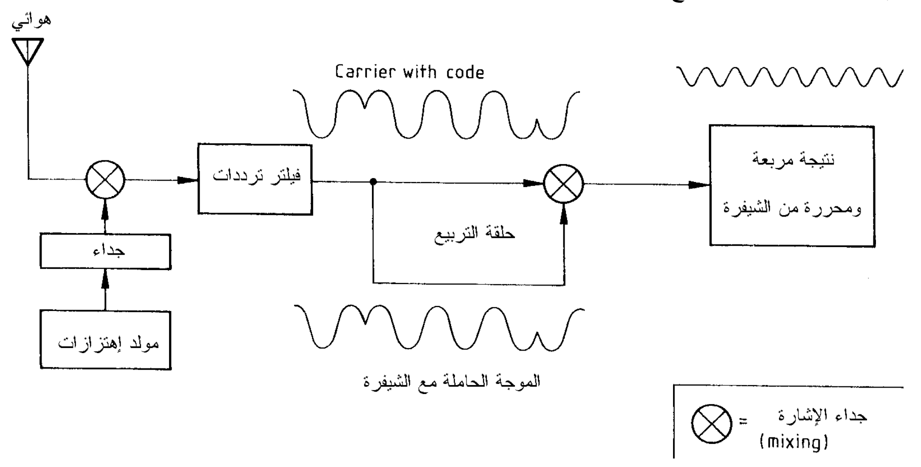
يعطي:

$$x^2 = P(t)^2 \sin(\omega\, t)^2 = P^2(1-\cos 2\omega t)/2 \qquad 4.26$$

بإعتبار أن *P(t)* هو مجموعة من *+1* و *-1* ، مشكّلا الشيفرة، فهذا يقود إلى أن $P(t)^2=P^2$ يساوي مجموعة من *+1* ولذلك يختفي من العلاقة *4.26*.

بواسطة x^2 يتم الحصول على إشارة حاملة صافية، ذات طور مساوي لطور الموجة الحاملة الأصلية ولكن بتردد مساوي لضعف تردد الموجة الأصلية. في هذا الإجراء تنقص أيضا نسبة الإشارة إلى التشويش *Signal/Noise ratio*. ومنه فإن طريقة الجداء لها المساوئ التالية:

- طول الموجة ينقسم إلى النصف
- نسبة الإشارة إلى التشويش تصبح أسوأ.



شكل *4.16*: تصميم طريقة الجداء.

تم إستعمال الطريقة لأول مرة في لاقط *Mactrometer*. تستخدم حاليا طرق من نفس النموذج في اللواقط ذات الترددين لقياس طور الموجة الحاملة على الموجة الثانية L_2.

إضافة للطرق المذكورة فإن هناك طرق أخرى تم إستعمالها في سياق تطور صناعة اللواقط، منها مثلا طريقة مبدأ التداخل المتخذة من طريقة تداخل القواعد الطويلة جدا *Very Long Baseline Interferometry VLBI* (فقرة *1.4.1*).

بالإستفادة من الخبرات السابقة تم تطوير طرق حديثة لإستعمال الإشارة الثانية رغم تشويشها المتعمّد من خلال عملية *AS*. هذه الطرق ليست مستقلة عن الشيفرة بشكل كامل، ولكنها تستخدم الشيفرة النظامية *C/A-code* على الإشارة L_1 لإضافة حلقة رصد الإشارة الثانية L_2 مع الإستفادة من كون كلا الإشارتين تملكان نفس الشيفرة (المضمّنة والمشوشة) *P-code*. كنتيجة لذلك يتم الحصول على قياسات الشيفرة وطور الموجة الحاملة لكل من الإشارتين، وذلك حتى تحت تأثير عملية ال *AS*. يستخدم بعض مصنّعو اللواقط طرقا مركّبة من عدة طرق بهدف الحصول على قياسات دقيقة وقابلة للإستعمال.

4.7.4 **بعض نماذج اللواقط** *Examples of GPS Receievrs*

بإعتبار أن سوق لواقط الأقمار الصناعية يتطور بسرعة كبيرة، سوف يتم هنا ذكر أهم النماذج التي لعبت وتلعب دورا هاما في التطبيقات المختلفة.

– اللواقط التقليدية

هذه اللواقط أثّرت في تطور الطرق الجيوديزية في ال *GPS* وهما لاقط *TI4100* و *Macrometer* (أول لاقط صنع لأغراض جيوديزية). يذكر هنا الجهاز الأول:

أستخدم جهاز تكساس الملاح *Texas Instrument GPS Navigator* لاقط *TI4100* لأول مرة في عام *1984* وكان أول لاقط *GPS* يؤمن كافة القياسات المهمة بالنسبة للجيوديزيين والمساحين والملاحين، وهو عبارة عن لاقط ثنائي التردد ذو إستقبال متعدّد متقابل *muliplexing receiver*. يسجّل الجهاز أنواع القياسات التالية:

– أشباه المسافات بواسطة الشيفرة الدقيقة *P-code* وعلى كلا الترددين L_1, L_2

– أشباه المسافات بواسطة الشيفرة النظامية *C/A-code* على التردد الأول L_1

– أطوار الموجتين الحاملتين L_1 و L_2، وذلك كل ثلاث ثواني.

يتم تسجيل القياسات على شريط تسجيل في آلة تسجيل خارجية أو تحوّل مباشرة إلى كومبيوتر صغير. الإتصال بين الراصد واللاقط يتم بواسط وحدة تحكم صغيرة الحجم *control display unit CDU*. من أجل الأغراض الملاحية يؤمّن المعالج في اللاقط المواقع والسرعات في الزمن الحقيقي *real time* كل *3* ثواني. الجهاز ضخم ويمكن أن يتمّ وضعه في حقيبتين للنقل: الهوائي والمضخم (*1.7 kg*)، اللاقط والمعالج (*24 kg*)، مسجل القياسات (*7 kg*)، وحدة التحكم (*0.5 kg*). إحتياجه للطاقة كبير (*22 V-32 V DC*)، ويصل إستهلاكه إلى *90* واط أثناء فترة تشغيله. تراوحت دقّة قياساته على الشكل التالي:

0.6-1 m على الشيفرة الدقيقة *P-code*،

6-10 m على الشيفرة النظامية *C/A-code*،

2-3 mm على طور الموجة الحاملة.

تم إستخدام هذا الجهاز بشكل واسع في مشاريع علمية وتطبيقية متعددة وما زال قيد الإستعمال. العديد من النتائج المنشورة ما بين *1985* و *1991* كانت مبنية على قياسات هذا اللاقط. المساوئ الرئيسية للجهاز بالمقارنة مع الأجهزة الأحدث هي:

– حجمه الكبير

– إستهلاكه الكبير للطاقة

– صعوبة تشغيله

– محدودية رصده لأربع أقمار فقط

– دقة القياس المنخفضة للطور المقاس

– حساسية الهوائي لظاهرة تعدد طرق الإشارة *multipath* وتغيّر مركز الطور في الهوائي *phase center variation*.

يمكن أن يتم توصيل لاقطين إلى هوائي واحد بحيث أن الهوائي يمكنه رصد حتى السبعة أقمار. بعد تشغيل عملية ضد الشويش المذكورة *AS*، يمكن تشغيل اللاقط *TI4100* كلاقط ذو تردد واحد (شيفرة نظامية *C/A-code*).

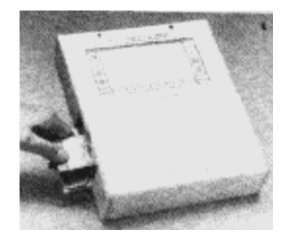
– اللواقط الحديثة

اللواقط الحالية المستعملة في الجيوديزيا والمساحة والملاحة الدقيقة تحوي أكثر أو كل الإمكانيات المذكور سابقا. بدأت أكثر النماذج تقريبا كلواقط ذات تردّد واحد وشيفرة واحدة *C/A-code* مع قابلية رصد أكثر من أربعة أقمار. في مرحلة لاحقة تم إكمال بناء اللواقط لترصد التردد الآخر L_2 بإستعمال طريقة الجداء أو التربيع *squaring technique* المذكورة، وتم أيضا رفع عدد الأقمار الممكن رصدها بشكل متزامن. في مرحلة ثالثة تمت إضافة الشيفرة الدقيقة إلى التردد الثاني L_2 لإمكانية الحصول على نوعية عالية للإشارة الملتقطة وكذلك بطول موجة كامل لإشارة L_2. كمرحلة أخيرة تمّ إدخال تقنية حديثة لتخفيف تأثير عملية ضد التشويش *AS*.

في عام *1991* أنتجت شركة *Leica* لاقطا يدعى *Wild GPS System 200*. الأجزاء الداخلية تشكّل المجس ثنائي التردد *SR299 dual frequncy sensor*، ووحدة التحكم الصغيرة الحجم *CR233 GPS controler* و بطارية (نيكل-كاديميوم *NiCd*) لتسجيل القياسات. هناك بطاقة ذاكرة يتم إدخالها في مكانها الخاص في وحدة التحكم. يمكن رصد حتى تسعة أقمار بآن واحد على كلّ من الترددين. إن الشيفرة النظامية *C/A-code* تستخدم لإعادة إنشاء أطوار الموجة الأولى L_1، بينما تستخدم الشيفرة الدقيقة *P-code* لإعادة إنشاء الموجة الثانية L_2. إذا كانت الشيفرة الدقيقة معرّضة لتأثير عملية ضد التشويش *Anti Spoofing AS* (المشغّلة من قبل قسم الدفاع الأمريكي *DoD*) فإن اللاقط يغيّر طريقة معالجة الشيفرة الدقيقة بشكل آلي وذلك إلى طريقة دون إستخدام الشيفرة *Code-less* L_2. تدعى الطريقة المتبعة هنا لمعالجة الإشارة بطريقة الجداء بمساعدة الشيفرة *code aided squaring technique*، وهذا ما أعطى تحسّنا لمستوى تشويش الإشارة *noise level* الملتقطة بمقدار *4.5* مرة.

يزن المجس ،وضمنه الهوائي من نمط الشرائط الدقيقة *microstrip*، مقدار *2.2 kg*. تقود وحدة التحكم المجسّ وتراقب القياسات وتعرض نتائجا فورية ومعلومات إضافية عن حالة القياس والأقمار وإشاراتها. تزن وحدة التحكم *1.1 kg*. تحتاج المجموعة تغذية كهربائية ذات *12 Volt*. يستهلك المجس *8.5* واط أثناء عمله.

تطور آخر في مجال اللواقط كان اللاقط *Rogue SNR-8* وما تبعه، وقد تم تطويره خصيصا للتطبيقات الجيوديناميكية لوكالة الأبحاث الفضائية الأمريكية *NASA*. إحدى أهم خواصه أن له مستوى تشويش قياسات *measurment noise* متدني جدا للشيفرة مما يعطي وسيلة جيدة لإدماج إشارات الشيفرة مع الموجات الحاملة. النماذج الحديثة من هذا اللاقط *TurboRogue SNR 8000* تكون صغيرة الحجم وسهلة الإستعمال. حجم اللاقط الأخير يبلغ *29x23x6 cm*، يزن *4 kg* ويستهلك أقل من *15* واط، ويحتوي على *8* قنوات لكل من الإشارتين ويؤمن قياسات الطور والشيفرة على كلا الإشارتين (شكل *4.17*). هناك إمكانية التغيير الآلي إلى طريقة الرصد بدون شيفرة *code-less tracking* وذلك في حال كانت الشيفرة الدقيقة متأثرة بعملية التشويش المتعمد *AS*. الحالة المسبقة التعريف في اللاقط *default* هي حالة رصد الشيفرة الدقيقة *P-code* والتي تؤمّن قياسات عالية الدقة للطور وأشباه المسافات. إنّ الرصد بدون شيفرة يعتمد على أن كل موجة تحوي نفس الشيفرة (إما الدقيقة *P-code* أو الدقيقة المحمية *Y-code*) ولذلك يمكن للإشارة الأولى L_1 أن تترابط مع الثانية L_2 (*corss-correlated*) حيث يتم الحصول على فرق القياس (L_1-L_2) وقياسات زمن تأخير الحزمة *group delay* (P_1-P_2).



شكل *4.17*: اللاقط *TurboRogue SNR 8000*.

دقة القياسات في هذا اللاقط (*random noise*):

- شبه الطول المقاس على الشيفرة الدقيقة $\leq$ *1 cm* وذلك بعد *5* دقائق قياس
- شبه الطول المقاس بدون شيفرة ~ *10 cm* وذلك بعد *5* دقائق قياس
- طور الموجة الحاملة *0.2-0.3 mm*
- طور الموجة بدون الشيفرة *0.2-0.7 mm*.

يتمتع اللاقط *TurboRogue SNR 8000* بمقدار ضئيل جدا من القياسات المفقودة (فقرة *4.10.1*) التي يتكرر حدوثها أثناء عملية القياس (*cycle slips*).

من اللواقط الجيدة الأخرى التي تستعمل بشكل واسع أيضا في التطبيقات الجيوديزية هناك سلسلة منتجات كل من *Trimble* و *Ashtech*.

– اللواقط الملاحية *navigation receivers*

يتوسع سوق اللواقط الملاحية بسرعة كبيرة. تستعمل في أغلب الحالات قناة وحيدة للشيفرة النظامية *C/A- code* والتي تعمل على مبدأ التبديل *sequencing* أو التعدد *multiplexing* (فقرة *4.1.7*). ولكن الأجهزة ذات أربع قنوات أو أكثر تلقى رواجا كبيرا. يتم في اللواقط الملاحية إشتقاق المواقع والسرعات من قياسات أشباه المسافات بواسط الشيفرة النظامية، ويتم إظهارها على شاشة اللاقط أو تحويلها إلى كومبيوتر. لايمكن الحصول عادة على القياسات الأصلية ولا على معلومات عن طور الموجة الحاملة. يمكن العمل بطريقة الملاحة التفاضلية *differential navigation* بإستخدام اللواقط الحديثة (فقرة *4.13*).

يهتم المصنّعون بإنتاج لواقط يمكن تركيبها داخل أجهزة أخرى. يجب أن يحتوي اللاقط الملاحي تغذية كهربائية، هوائي، مضخم *preamplifier*، معالج وبرامج مرافقة. أغلب اللواقط في الوقت الحالي تعطي موقع وزمن. ومنها تؤمّن قياسات طور الموجة الحاملة، مما يفتح قاعدة كبيرة للقيام بأعمال مساحية رخيصة الكلفة. نأخذ هنا أحد اللواقط الملاحية، ماجلان *Magellan 1000 PRO* على سبيل المثال. وهو لاقط وحيد القناة يرصد *3-4* أقمار بنسبة تجديد *updating rate* (للمواقع المحسوبة والمدرجة على الشاشة) *2.5 sec* وله وصلة من نموذج *RS232* (يمكن وصله مع الكومبيوتر). النماذج الأحدث منه هي سلسلة *Magellan PROMARK X* ذو عشر قنوات يمكنها رصد كل الأقمار المرئية وبنسبة تجديد *1* ثانية، ويمكنه إنجاز عملية الملاحة التفاضلية. يمكن إستعماله أيضا لإستخلاص قياسات الطور وذلك بإضافة القطعة الداخلية المناسبة لذلك (كما في النموذج *Magellan PROMARK X-CP* مثلا).

الهوائي من نوع الحلزون التربيعي *quadrifilar* مبني مع الجهاز، ويمكن إستخدام هوائي خارجي من أجل التطبيقات في العربات (سيارات، طائرات). وزنه *850 gr* يمكن تشغيله كمحطة مرجعية في عملية القياسات النسبية *DGPS* (فقرة *4.13*). هناك أيضا إمكانية معالجة القياسات لاحقا (في المكتب) *post processing*. يمكن الحصول على دقة نسبية بحدود *3-5 m*. وهذا يكفي في حالات متعددة، مثلا من أجل تعيين نقاط مرجعية للصور الجوية من الأقمار الصناعية الأخرى، أو من أجل إدخال معطيات في نظام معلومات جغرافية *Geographic Information System GIS*. وهناك أيضا إمكانية الحصول على دقة الديسمترات وذلك بإستعمال قياسات الطور *phase*.

هناك، كما تم ذكره، العديد من اللواقط الملاحية *Navigators* الأخرى في الأسواق، يذكر منها مثلا *Trimble Ensign* ذو ثلاث قنوات يرصد لغاية الثمانية أقمار (وزنه *400 g*)، ولاقط *Motorola TRAXLER* ذو القنوات الستة والذي يرصد كل الأقمار المرئية (وزنه *489 g*) واللاقط الملاحي *Garmin GPS 100 AVD* الذي يمكن أن يرصد لغاية الثمانية أقمار ويستخدم غالبا في الأجهزة العسكرية.

تذكر أحدث المنتجات في هذا المجال بمجلات إختصاصية مثل *GPS World*.

4.7.5 نظرة عامة *Overview and Evaluation*

تم إدراج المواصفات الرئيسية للّواقط المتعددة الأغراض المذكورة سابقا، من وجهة نظر التطبيقات الجيوديزية، في اللائحة *4.4*. أهم العوامل هي عدد الأقمار التي يمكن رصدها بآن واحد، طول موجة الإشارة الثانية L_2، درجة تشويش القياس وحالة الرصد عند تشغيل عملية ضد التشويش *Anti-Spoofing*.

اللاقط	قنوات L_1		شيفرة L_1		طول الموجة L_2	ضد التشويش *AS* L_2
TI 4100	*4*	*4*	*P*	*P*	λ	تردد واحد
Macrometer	*6*	*6*	–	–	$\lambda/2$	لايتأثر
Ashtech XII	*12*	*12*	*C/A*	–	$\lambda/2$	لايتأثر
Ashtech P12	*12*	*12*	*C/A,P*	*P*	λ	تربيع *squaring*
Trimble SST	*8-12*	*8-12*	*C/A*	*P*	$\lambda/2$	لايتأثر
Trimble 4000 SSE	*9-12*	*9-12*	*C/A,P*	*P*	λ	بدون شيفرة
WM102	*7* متوازية	*1* تبادلية	*C/A*	*P*	λ	تربيع
Wild GPS 200	*9*	*9*	*C/A*	*P*	λ	بدون شيفرة
TurboRogue	*8*	*8*	*C/A,P*	*P*	λ	بدون شيفرة

لائحة *4.4*: نظرة عامة عن لواقط جيوديزية بترددين.

بعض الأمور الواجب مراعاتها في إختيار لاقط *GPS* للأعمال الجيوديزية هي:

– رصد كل الأقمارالمرئية (الموجودة فوق أفق الراصد)
– إمكانية الرصد بالترددين
– طول كامل للموجة الثانية
– تشويش بسيط لقياس الطور
– تشويش بسيط للشيفرة
– تردد عالي للقياسات *sampling rate* على كل من الترددين
– سعة ذاكرة كبيرة
– إستهلاك قليل للطاقة
– إمكانية العمل تحت تأثير عملية ضد التشويش *Anti-Spoofing*.

ينصح بإستعمال اللواقط ذات الترددين للمشاريع المساحية والجيوديزية، وذلك بسبب تأثير طبقة الإيونوسفير*ionosphere* الحرج على القياسات (فقرة *2.3.2* و *4.14.4.1*) وكذلك من أجل حل مشكلة الغموض *Ambigiuty* (في قياسات الطور) التي سيأتي ذكرها لاحقا (فقرة *4.9.3*).

إن لاقطا وحيد التردد (وشيفرة نظامية *C/A-code*) يفي بالدقة اللازمة من أجل التطبيقات الملاحية. من أجل متطلبات دقّة أفضل من *50-100 m* فلا غنى عن الحل التفاضلي *differential* (فقرة *4.13*). من أجل متطلبات دقّة أقل من *5 m*، فمن الضروري إدماج طور الموجة الحاملة. ينصح في الملاحة عالية الدقة (تصوير جوي *photogrametry*، رسم خرائط بحرية *hydrography*) بإستعمال زوجا من اللواقط الجيوديزية الكاملة.

4.8 القياسات ومعالجة المعطيات *GPS observables and Data Processing*

4.8.1 القياسات

القياسات الرئيسية هي:

– أشباه الأطوال محسوبة من الشيفرة
– فروقات أشباه الأطوال محسوبة من عدد دوبلر المكامل *integrated Doppler count* (شكل *4.17a*)

– أطوار الموجات الحاملة أو فروقاتها

– فروقات في زمن إنتشار الإشارة محسوبة من القياسات التداخلية.

إن شبه طول مشتق من الشيفرة يساوي الإنزياح الزمني الضروري لإرتباط جزء الشيفرة القادم مع جزء شيفرة مولّد في اللاقط (فقرة *4.4*)، مضروبا بسرعة الضوء.

معادلة الرصد الأساسية لشبه الطول

$$\begin{aligned} PR_i &= |\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_B| + c\,dt_u = c\tau_i \\ &= ((X_i - X_B)^2 + (Y_i - Y_B)^2 + (Z_i - Z_B)^2)^{\frac{1}{2}} + c\,dt_u. \end{aligned} \quad 4.27$$

حيث لدينا (شكل *4.18*)

R_i المسافة الهندسية بين هوائي القمر الصناعي S_i وهوائي اللاقط B

X_i شعاع موقع القمر الصناعي في الجملة الجيومركزية *CTS* (فقرة *2.1.2*) ذو المركبات X_i، Y_i، Z_i

X_B شعاع الموقع لهوائي اللاقط في الجملة الجيومركزية *CTS* ذو المركبات X_B، Y_B، Z_B

τ_i زمن إنتشار الإشارة المقاس بين القمر S_i وهوائي الراصد B

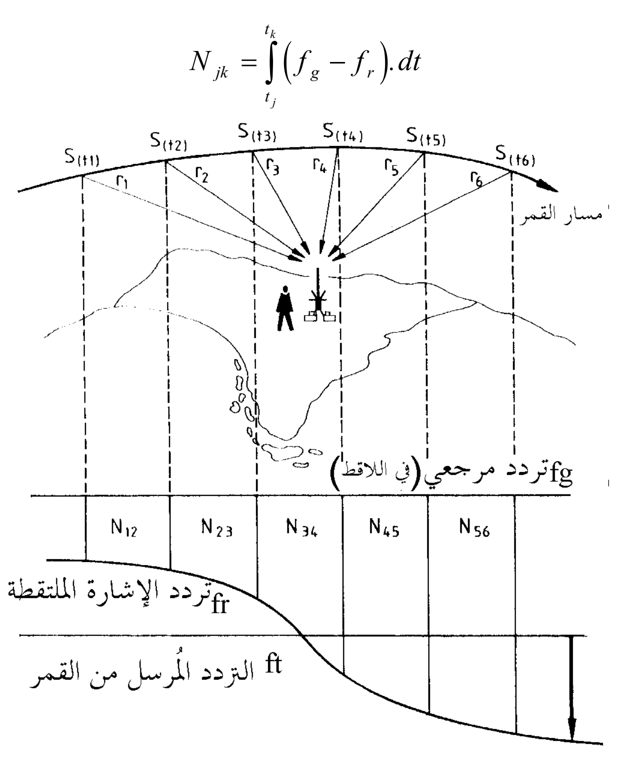
dt_U خطأ تزامن الساعة بين زمن نظام ال *GPS* وساعة اللاقط

c سرعة إنتشار الإشارة.

يمكن إشتقاق إحداثيات هوائي الراصد من قياسات مسافات متزامنة لأربعة أقمار (شكل *4.2*).

يمكن أن يتم إشتقاق فروقات أشباه الأطوال من قياسات إنزياح دوبلر *doppler shift* لتردّد الموجة الحاملة الواصلة إلى اللاقط. يقاس إنزياح تردّد الموجة الملتقطة f_r بالنسبة للتردد المرجعي f_g داخل اللاقط ويعطي عدد دوبلر المكامل (شكل *4.17a*):

$$N_{jk} = \int_{t_j}^{t_k} \left(f_g - f_r\right).dt \quad 4.28$$



شكل *4.17a*: عدد دوبلر المكامل.

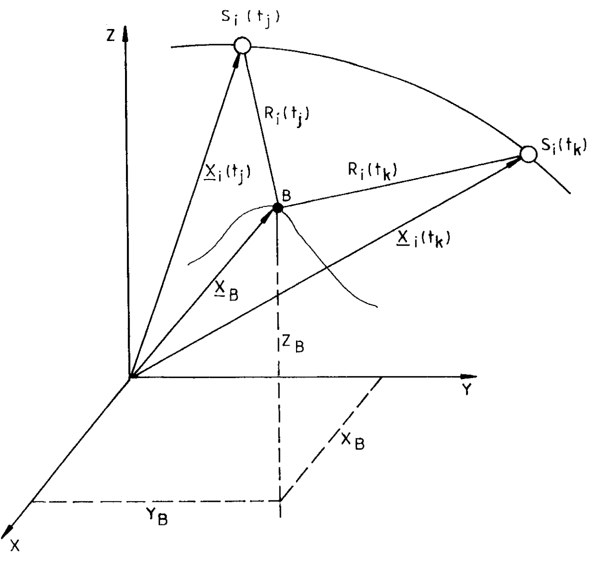
N_{jk} هو مقياس لفرق المسافة بين هوائي اللاقط B وموضعين متتاليين في المسار لنفس القمر S_i بنقطتين زمنيتين مختلفتين t_j, t_k. معادلة الرصد الموافقة:

$$\Delta\tilde{n} R_i = \left|X_i(t_k) - X_B\right| - \left|X_i(t_j) - X_B\right| = \frac{c}{f_0}\left(Njk - (f_g - f_s)(t_k - t_j)\right) \quad 4.29$$

حيث: f_r التردد المرجعي المولّد في اللاقط

f_g تردد الإشارة الصادرة من هوائي القمر

f_r تردد الإشارة الواصلة إلى هوائي اللاقط.



شكل *4.18*: علاقات هندسية في التوضع بالأقمار الصناعية.

من الممكن أيضا قياس إنزياح دوبلر في الشيفرة، ولكن الدقة الناتجة تكون ضعيفة بسبب تردد الشيفرة الصغير بالنسبة لتردد الموجة الحاملة.

يتم إستخلاص طور الموجة من المقارنة بين الإشارة الملتقطة المعانية من إنزياح دوبلر f_{CR} وتردد الإشارة الثابتة المولّدة في اللاقط f_0. القياس هو الفرق المقاس بين الطورين:

$$\Phi_B = \Phi_{CR} - \Phi_0 \quad 4.30$$

وبإعتبار

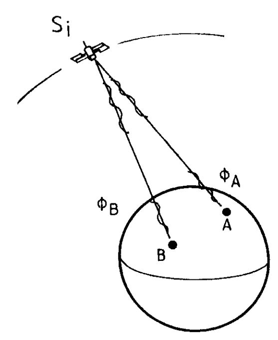
λ طول الموجة الحاملة،

N_{Bi} العدد الصحيح المجهول لأطوال الموجة في المسافة R_i وتدعى الغموض *ambiguity* (فقرة *4.9.3*)،

dt_U خطأ تزامن الساعة، نحصل على معادلة الرصد الأساسية لقياسات الطور (شكل *4.19*):

$$\Phi_{B_i} = \frac{2\pi}{\lambda}\left(\left|X_i - X_B\right| - N_{B_i}\lambda + cdt_U\right). \quad 4.31$$

الصعوبة الرئيسية في هذه الطريقة هي تعيين الغموض (عدد الموجات N_{Bi}) لأن القياس يعيّن الطور ضمن طول موجة واحد (فقرة *2.3.1*). يجب تعيين حد الغموض N_{Bi} بطرق خاصة، أو يجب أن تكون المسافة معروفة مبدئيا بدقة تناسب نصف طول الموجة (*~10 cm*).



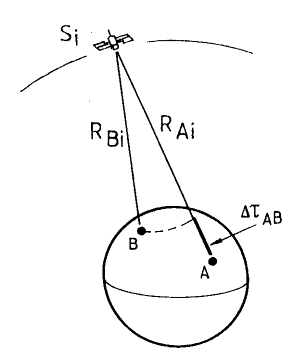
شكل *4.19*: مفهوم الرصد بتفاضل الطور.

يعتبر غالبا فرق الطور لإشارة القمر نفسها، والمقاسة على محطتين *A* و *B* كقياس رئيسي. وتكون معادلة الرصد للتفاضل البسيط أو الوحيد للطور *single phase differnce*:

$$\Delta\Phi_{AB_i} = \Phi_{B_i} - \Phi_{A_i} = \frac{2\pi}{\lambda}(|\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_B| - |\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_A|) - (N_{B_i} - N_{A_i})\lambda + c(dt_{u_B} - dt_{u_A}). \quad 4.32$$

تدعى القيمة الأصلية المقاسة في المعادلة *4.31* للتوضيح بقياس الطور الغير مفاضل *undifferenced* أو قياس الطور الصفري *zero phase measurement*.

في حال قياسات التداخل *interferometric measurements* فإن إشارات نظام ال *GPS* تستعمل دون معرفة تركيب الإشارة (شكل *4.20*). يتم تسجيل الإشارات مع علامات زمنية *time marks* دقيقة وذلك على محطتين على الأقل *A* و *B* ، ومن ثمّ تتم عملية الإرتباط *correlation* بينهما.



شكل *4.20*: مفهوم الرصد بتفاضل الزمن المتداخل.

القياس الأساسي هنا هو الفرق $\Delta\tau_{A,Bi}$ بين زمن وصول إشارة قمر معيّن S_i إلى كلا المحطتين. هذا القياس يمكن أن يحوّل إلى فرق مسافة R_{Ai}-R_{Bi}. تصبح معادلة الرصد:

$$\Delta\tau_{A,B_i} = \frac{(R_{B_i} - R_{A_i})}{c} = \frac{(|\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_B| - |\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_A|)}{c} + (dt_{u_B} - dt_{u_A}) \quad 4.33$$

الطريقة مشابهة جدا لطريقة التداخل على القواعد البعيدة والتي تستخدم إشارات من الأجسام السماوية البعيدة *very long baseline interferometry VLBI*.

تم حتى الآن شرح أربعة نماذج من القيم المقاسة. إثنان منهم يستعملان نادرا في الجيوديزيا التطبيقية. عدد دوبلر المكامل يحتاج لزمن رصد طويل (عدة ساعات) ليسمح بتغيّر التوزع الهندسي للأقمار *satellite geometry* بشكل كافي، ويتطلب مولّدات تردّد عالية الثباتية *very stable oscillators* (فقرة *2.2.5*). تستعمل الطريقة لتعيين الغموض. وطريقة التداخل الحقيقية تحتاج إلى أجهزة متنوعة ومعالجة واسعة للقياسات.

لذلك يستعمل عمليا نوعين من القياسات الرئيسية التي يمكن إعتبارها كقياسات أشباه أطوال:

– طور الشيفرة (أشباه أطوال محسوبة من قياسات الشيفرة)
– طور الموجة الحاملة (أشباه أطوال محسوبة من قياسات طور الموجة الحاملة).

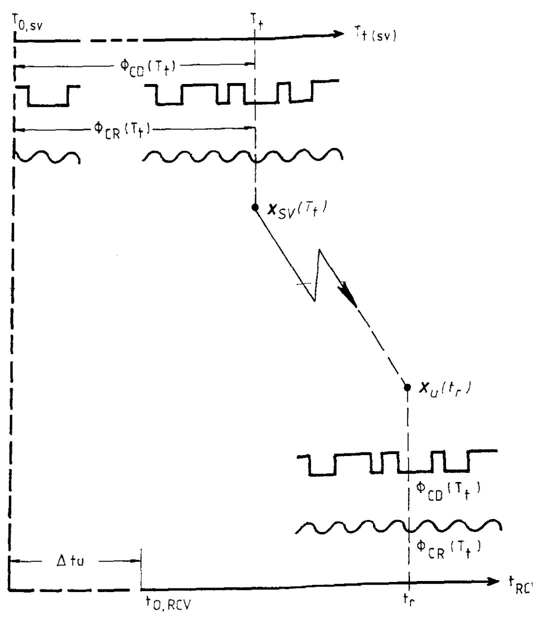
4.8.2 أطوار الشيفرة والموجة الحاملة *Code and Carrier Phases*

يعرض الجدول *4.5* المواصفات والفروقات الرئيسية بين نوعي القياسات.

	الشيفرة	الموجة الحاملة
طول الموجة	*P-code 29.3 m* *C/A-code 293 m*	*L1 19.05 cm* *L2 24.45 cm*
تشويش القياس *noise*	*P-code 0.6-1 m*	
لاقط تقليدي	*C/A-code 10 m*	*1-3 mm*
لاقط متطور	*P-code 2-5 cm*	< *0.2 mm*
تأثير إنتشار الإشارة *propagation effects*	التأخير الإيونوسفيري *+ΔTion*	التسريع الإيونوسفيري *-ΔTion*
الغموض *ambiguity*	لايحوي غموض	يحوي غموض

جدول *4.5*: المواصفات الرئيسية للشيفرة والموجة الحاملة.

يتم فيما يلي شرح طريقة إنتشار الإشارة وطريقة القياس. الشكل *4.21* يوضّح إنتشار الشيفرة والموجة الحاملة.



شكل *4.21*: إنتشار إشارة الشيفرة والموجة الحاملة.

من الشكل تعني الرموز التالية:

T زمن القمر (نظام زمني خاص بالقمر المعيّن بالدليل SV)

t زمن اللاقط (معين بالدليل RCV)

الدليل t يشير إلى الإشارة المرسلة *transmitted*

الدليل r يشير إلى الإشارة الملتقطة *received*

f_{CD} تردّد الشيفرة

f_{CR} تردّد الموجة الحاملة

حالات الإشارة (الأطوار) لحظة الإرسال هي:

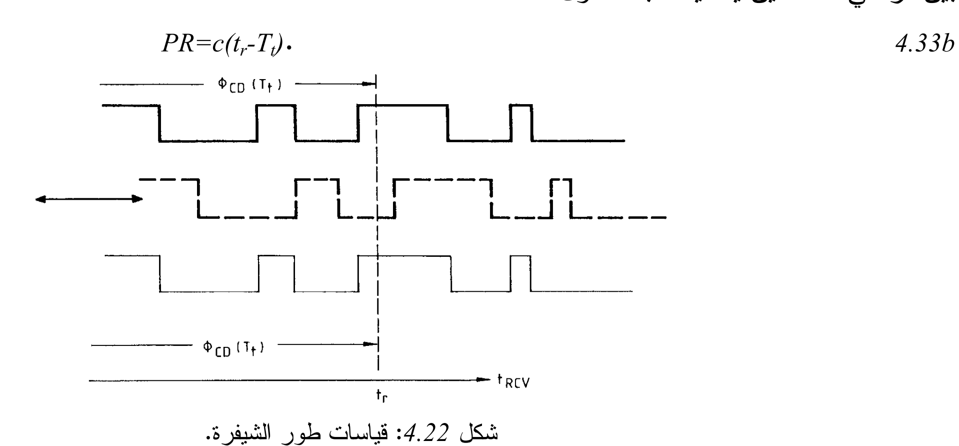
الشيفرة: $$\Phi_{CD}(T_t) = T_{tSV} \cdot f_{CD}$$

$$\Phi_{CR}(T_t) = T_{tSV} \cdot f_{CR}$$ الموجة الحاملة: *4.33a*

وذلك حسب العلاقة الأساسية بين الطور، التردد والزمن (*2.67*). يغادر طور الموجة الحاملة $\Phi_{CR}(T_t)$ هوائي القمر الصناعي في اللحظة T_t مقاسة حسب الإطار الزمني للقمر. تنتشر الإشارة بسرعة تقارب سرعة الضوء وتصل إلى هوائي اللاقط بلحظة t_r مقاسة حسب إطار زمن اللاقط. يصلح هذا التفسير أيضا لإشارة الشيفرة. لاحظ أن حالات الطور للإشارات الملتقطة هي نفسها للإشارات المرسلة. بتعبير آخر، فإن قياس حالة الطور في اللاقط يعني قياس لحظة إرسال الإشارة من القمر (شكل *4.21*).

طريقة قياس طور الشيفرة موضّحة في الشكل *4.22*. يتم زيحان جزء الشيفرة المولّد في اللاقط بالنسبة لجزء الشيفرة الملتقط بالتدريج لغاية الحصول على إرتباط أعظمي (فقرة *4.4*). يتم، في لحظة الإرتباط الأعظمي، قياس طور الشيفرة الداخلية حسب إطار زمن اللاقط t_r. طور الشيفرة هذا مطابق لطور الشيفرة المرسل من القمر وذلك بإهمال $\Phi_{CD}(T_t)$ تأخير إنتشار الإشارة داخل قنوات اللاقط. بذلك نحصل على لحظة إرسال حالة الشيفرة في إطار زمن القمر. الفرق بين قرائتي الساعتين يعطينا شبه الطول:

$$PR=c(t_r-T_t).$$ *4.33b*



شكل *4.22*: قياسات طور الشيفرة.

ليكن

dt_s خطأ ساعة القمر بالنسبة لزمن النظام

dt_u خطأ تزامن ساعة اللاقط

dt_a تأخير إنتشار الإشارة في طبقات الأتموسفير *atmosphere*

ε_R تشويش القياس

R البعد المائل، نحصل على معادلة متطورة أكثر لقياسات الشيفرة:

$$PR_{CD} = c(t_r - T_t) = R + cdt_u + cdt_a + cdt_s + \varepsilon_R \qquad 4.34$$

إضافة لذلك فإنه يمكن إعتبار تأخير إنتشار الإشارة داخل قنوات اللاقط، ولكن لايمكن فصله عن أخطاء الساعة ولذلك يؤخذ بعين الإعتبار في تصحيحات الساعة المحسوبة لاحقا.

تحلّ المعادلة *4.34* بالتقريب المتتالي لأن البعد المائل R بين اللاقط والقمر بزمن الإرسال والإستقبال يعطى بالعلاقة البسيطة:

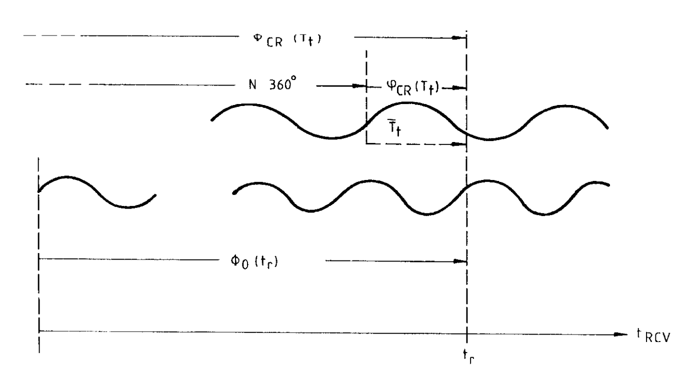
$$R^2 = (X_S(T_t) - X_B(t_r))^2 + (Y_S(T_t) - Y_B(t_r)^2 + (Z_S(T_t) - Z_B(t_r))^2 \qquad 4.35$$

حيث

$$T_t = t_r - \frac{R}{c}$$

يوضّح الشكل *4.23* طريقة قياس طور الموجة الحاملة. القياس هو عبارة عن الفرق بين طور الموجة الحاملة المرسلة من القمر والتي قد عانت من إنزياح دوبلر *doppler shifted* $\varphi_{CR}(T_t)$ (معرّفة في إطار زمن القمر)، وطور الموجة الحاملة المرجعية (معرّفة في إطار زمن اللاقط) $\phi_0(t_r)$. الطور النسبي المقاس:

$$\varphi_m(t_r) = \varphi_{CR}(T_t) - \Phi_0(t_r) \qquad 4.36$$



شكل *4.23*: قياس طور الموجة الحاملة

يمكن كتابة طور الموجة الحاملة بإستخدام العلاقة *4.33a* كما يلي:

$$\varphi_{CR}(T_t) = \varphi_m(t_r) + \Phi_0(t_r) = \varphi_m(t_r) + t_r \cdot f_0 \qquad 4.37$$

وبالتعويض وفق الشكل *4.23*،

$$\Phi_{CD}(T_t) = N.360^\circ + \varphi_{CR}(T_t) \cdot \qquad 4.38$$

بإعتبار N عدد الغموض الصحيح، نحصل على تعبير للحظة إرسال T_t إشارة طور الموجة الحاملة وفق إطار زمن القمر:

$$T_t = \frac{\Phi_{CD}(T_t)}{f_{CR}} = \frac{\varphi_{CR}(T_t) + N}{f_{CR}} = \overline{T_t} + \frac{N}{f_{CR}}. \qquad 4.39$$

ويكون شبه الطول محسوبا من قياسات طور الموجة الحاملة

$$PR_{CR} = c(t_r - \overline{T_t}) \qquad 4.40$$

وبإعتبار حد الغموض التالي

$$c.\frac{N}{f_{CR}} = N.\lambda_{CR} \qquad 4.41$$

تكون معادلة الرصد لطور الموجة الحاملة، وفق التعريف في المعادلة *4.34* كالتالي:

$$PR_{CD} = R + cdt_u + cdt_a + cdt_s + c\left(\frac{N}{f_{CR}}\right) + \varepsilon_R \qquad 4.42$$

4.9 تقدير الوسائط *Parameter Estimation*

4.9.1 التركيبات الخطية والقياسات المشتقة *Linear Combinations and Derived Observables*

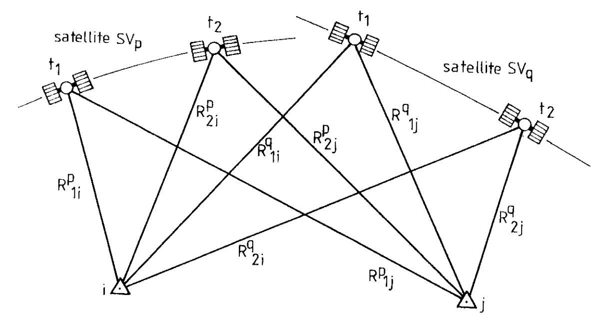
من الملاحظ أنّ كلا نوعي القياسات، طور الشيفرة والموجة الحاملة يقودان إلى حساب أشباه الأطوال، لذلك فمن المفيد إستغلال كافة القياسات، أو تركيبات خطّية لها، في عملية تقدير الوسائط. مبدئيا، هناك عدد لانهائي لإمكانيات تركيب قياسات مختلفة ولتشكيل أنواع قياسات مشتقّة، ولكن عدد محدود فقط من الإمكانيات له فائدة في عملية التوضع المعتبرة هنا. نميز هنا التركيبات الخطية التالية:

– بين قياسات على محطات مختلفة

– بين قياسات من أقمار مختلفة
– بين قياسات بلحظات زمنية مختلفة
– بين قياسات من نفس النموذج
– بين قياسات من نموذج مختلف.

إحدى الفوائد الهامة من عملية التركيب هي أن بعض الأخطاء الموجودة في القياسات الأصلية يتم عدْمها أو الحد الكبير من تأثيرها عندما نشكّل التفاضل (الطرح) بين القياسات الأصلية. في بعض الحالات يكون حساب الغموض في القياسات المشتقة (المركبة) أسهل بكثير من حسابه في القياسات الأصلية. من ناحية أخرى، يمكن أن يرتفع مقدار تشويش *noise* (الخطأ المتوسط التربيع) القياس عندما نشتقّه من قياسين إثنين (في عملية الطرح أو الجمع). لذلك يجب التفكير بعناية قبل إعتماد أي تركيب خطّي للقياسات في عملية تقدير المجاهيل.

التركيبات الخطية العامة تكون بين محطات الرصد والأقمار. حسب الشكل *4.24* نلاحظ:



شكل *4.24*: تفاضل بين لواقط وأقمار.

– لاقطين *i,j*
– قمرين *p,q*
– نقطة زمنية (لحظة) t_1 موقع رقم *1* للأقمار *p* و *q*
– نقطة زمنية (لحظة) t_2 موقع رقم *2* للأقمار *p* و *q*
– ثمانية قياسات لأشباه الأطوال

$$PR^p_{1i}, PR^p_{2i}, PR^q_{1i}, PR^q_{2i};\ \ PR^p_{1j}, PR^p_{2j}, PR^q_{1j}, PR^q_{2j}.$$

وتلك يمكن أن تكون قياسات شيفرة أو طور الموجة الحاملة.

<u>التفاضل الوحيد *single difference*</u> يمكن أن يكون بين لاقطين، قمرين أو لحظتي قياس متتاليتين. فيما يلي يتم شرح كيفية تمييز كل نوع من التفاضلات المعنية بواسطة الدليل.

التفاضل الوحيد بين لواقط: $$\Delta(*) = (*)_{\text{jáÇÞØ}} - (*)_{\text{iáÇÞØ}} \qquad 4.43$$

التفاضل الوحيد بين أقمار: $$\nabla(*) = (*)^{\text{qÞãÑ}} - (*)^{\text{pÞãÑ}} \qquad 4.44$$

التفاضل الوحيد بين لحظتي قياس مختلفتين: $$\delta(*) = (*)_{\text{1áÍÙÉ}} - (*)_{\text{2áÍÙÉ}} \qquad 4.45$$

طريقة المعادلة *4.45* تستعمل بطريقة دوبلر *doppler*، وهي الأساس النظري لنظام الترانسيت *TRANSIT*. في جيوديزيا نظام ال *GPS* يشكّل عادة التفاضل بين لاقطين (علاقة *4.43*). (يتم طرح أشباه الأطوال المقاسة على محطة من أشباه الأطوال المقاسة على المحطة الأخرى). القياسات هي:

$$((PR^p_{1i} - PR^p_{1j}), (PR^p_{2i} - PR^p_{2j}), (PR^q_{1i} - PR^q_{1j},)(PR^q_{2i} - PR^q_{2j})). \qquad 4.46$$

من أجل أطوار الشيفرة ينتج لدينا من المعادلتين *4.43* و *4.34* المعادلة المبسطة:

$$\Delta PR_{CD_{ij}} = \Delta R_{ij} + c(dt_{u_j} - dt_{u_i}) + c(dt_{a_j} - dt_{a_i}) + c(dt_s - dt_s) + \epsilon_\Delta \qquad 4.47$$

وبتبسيط إضافي:

$$\Delta PR = \Delta R + c\Delta dt_u + \Delta d_a + c\Delta dt_s + \epsilon_{CD}. \quad 4.48$$

يقْسم تأخير إنتشار الإشارة بسبب الطبقات الجوية *atmospheric delay* إلى قسم الإيونوسفير d_{ion} وقسم التروبوسفير d_{trop}:

$$\Delta PR = \Delta R + c\Delta dt_u + \Delta d_{ion} + \Delta d_{trop} + c\Delta dt_s + \epsilon_{CD}. \quad 4.49$$

من أجل أطوار الموجة الحاملة وبإعتبار العلاقة *4.42*:

$$\begin{aligned}\Delta PR_{CR_{ij}} &= \Delta R_{ij} + c(dt_{u_j} - dt_{u_i}) + c(dt_{a_j} - dt_{a_i}) \\ &+ c(dt_s - dt_s) + \lambda_{CR}(N_i - N_j) + \epsilon_{\Delta CR}\end{aligned} \quad 4.50$$

وبإختصارها ينتج:

$$\Delta PR_{CR} = \Delta R_{ij} + c\Delta dt_{u_{ij}} + c\Delta dt_{a_{ij}} + \lambda_{CR}\Delta N_{ij} + \epsilon_{\Delta CR}. \quad 4.51$$

يمكن، بشكل مبسط، عرض التفاضل الوحيد بين اللواقط كما يلي:

$$\Delta\Phi = \Delta R + cdt_u - \Delta d_{ion} + \Delta d_{trop} + \lambda\Delta N + \epsilon_\Phi. \quad 4.52$$

نلاحظ هنا إختفاء خطأ ساعة القمر dt_s، وأن خطأ تأخير إنتشار الإشارة في الطبقات الجوية dt_a يؤثر فقط على قياسات المسافات بكمية الفرق المتبقية. من أجل محطات قريبة من بعضها يمكن إعتبار dt_{ai} و dt_{aj} متساوية وبالتالي تحذف في العلاقتين *4.50* و *4.47*. ونفس الشيء من أجل أخطاء المسار. يستعمل التفاضل الوحيد بكثرة في الملاحة النسبية (التفاضلية *differential*، شكل *4.28*).

في حال تم تشكيل التفاضل الوحيد بين قمرين (علاقة *4.44*، طرح قياسات متزامنة لقمرين في لاقط واحد)، يحذف حدّ خطأ ساعة اللاقط (العلاقتين *4.49* و *4.51*).

في حال تم تشكيل التفاضل الوحيد بين لحظتي قياس متتاليتين لنفس القمر، فإن حدّ الغموض في المعادلة *4.42* يحذف لأن غموض الطور البدائي لايتغير مع الزمن (طالما لايحدث فقدان قياسات *cycle slips* أثناء الرصد).

التفاضل الثنائي *double difference* يشكل عادة بين لواقط وأقمار ويشتق من تفاضلين وحيدين لقياسين بين لاقطين وطرحهما بين قمرين مختلفين SV_p, SV_q. القياسات المشتقة هي:

$$((PR_{1i}^p - PR_{1j}^p) - (PR_{1i}^q - PR_{1j}^q)), ((PR_{2i}^p - PR_{2j}^p) - (PR_{2i}^q - PR_{2j}^q \quad 4.53$$

ويمكن كتابة معادلة الرصد من أجل أطوار الموجة الحاملة بالشكل:

$$\begin{aligned}\nabla\Delta PR_{CR} &= (\Delta R_{ij}^p - \Delta R_{ij}^q) + c(\Delta t_{u_{ij}} - \Delta t_{u_{ij}}) + c(\Delta t_{a_{ij}^p} - \Delta t_{a_{ij}^q}) \\ &+ \lambda_{CR}(\Delta N_{ij}^p - \Delta N_{ij}^q) + \epsilon_{\nabla\Delta}\end{aligned} \quad 4.54$$

وتكتب المعادلة بشكل مبسط:

$$\nabla\Delta\Phi = \nabla\Delta R - \nabla\Delta d_{ion} + \nabla\Delta d_{trop} + \lambda\nabla\Delta N + \epsilon_\Phi. \quad 4.55$$

ومن أجل قياسات الشيفرة تكون معادلة الرصد:

$$\nabla\Delta PR = \nabla\Delta R + \nabla\Delta d_{ion} + \nabla\Delta d_{trop} + \epsilon_{CD}. \quad 4.56$$

نلاحظ هنا أن الحد المتعلق بساعة اللاقط DT_U يتلاشى. القياسات التفاضلية الثنائية *double difference observations* هي خالية من أخطاء ساعتي القمر واللاقط وتحتوي فقط أخطاء مختزلة للمدار وأخطاء إنتشار الإشارة *Propagation*. القياس التفاضلي الثنائي هو القياس الأساسي المعتمد في العديد من طرق تعديل قياسات ال *GPS*. القياسات التفاضلية

الثنائية *double difference observations* بين لواقط والزمن تكون محرّرة من حد الغموض *Ambiguity N* (فقرة *4.9.3*) وتستعمل غالبا لمعالجة قفزات القياسات *Cycle Slips* (فقرة *4.10.1*).

<u>التفاضل الثلاثي *triple differences*</u> بين لواقط، أقمار وزمن، ويتم تشكيلها بإتخاذ زمنين t_1, t_2. تنتج القياسات التالية:

$$((PR^p_{1i} - PR^p_{1j}) - (PR^q_{1i} - PR^q_{1j})), ((PR^p_{2i} - PR^p_{2j}) - (PR^q_{2i} - PR^q_{2j}$$

4.57

إن حد الغموض البدائي *Initual Ambiguity N* يحذف كما ذكر من معادلة الرصد ويتبقى فيها تركيب خطي لأشباه الأطوال وأخطاء المدار وإنتشار الإشارة. معادلة الرصد قي قياسات التفاضل الثلاثي *triple difference observations* هي نفسها من أجل الشيفرة وطور الموجة الحاملة بإستثناء إشارة حد تأثير طبقة الإيونوسفير *Ionosphere* على إنتشار الموجة (فقرة *4.14.4*، جدول *4.5*). الشكل المبسط لمعادلة الرصد في القياسات التفاضلية الثلاثية:

$$\delta\nabla\Delta\Phi = \delta\nabla\Delta R - \delta\nabla\Delta d_{ion} + \delta\nabla\Delta d_{trop} + \epsilon_{res}.$$

4.58

تستخدم القياسات التفاضلية الثلاثية *triple difference observations* للحصول على حلول تقريبية وهي مفيدة جدا للمساعدة في حذف قفزات القياسات بشكل آلي.

يمكن أن تشكل التركيبات الخطية لقياسات من نفس النوعية بين أطوار الموجة الحاملة وكذلك بين أطوار الشيفرة. يهدف الإستخدام الرئيسي لتلك التركيبات الخطية إلى حذف تأثير طبقة الإيونوسفير على إنتشار الإشارة *ionospheric delay*. يدعى هذا التركيب الخطي بالقياس المحرّر من تأثير الإيونوسفير *L_3 ionosphere free linear combination* ويشكّل حسب العلاقة

$$L_3 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot L_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot L_2.$$

4.48a

وله أيضا مساوئ مثل إزدياد التشويش عنه في القياسات الأصلية، وحد الغموض الغير صحيح العدد. ويتم حاليا إستخدام تركيبات خطية للقياسات لحل مسألة الغموض *ambiguity problem* مثل التركيب الخطي *L_5 Wide Lane linear combination* الذي يملك طول موجة مقداره *86.2 cm*. وكذلك الأمر هنا يملك هذا القياس المشتق تشويشا أعلى منه في القياسات الأصلية L_1, L_2. إن التركيب الخطي لقياسات الأطوار والذي يملك أقل مستوى تشويش، ويعطي بذلك نتائج دقيقة (في المسافات القصيرة)، هو L_Σ ويسمى بتركيب المجال الضيق *narraw lane linear combination*.

4.9.2 مفاهيم حل الوسائط *Concepts of Paramrtrization*

كما وجدنا أن القياسات الرئيسية، أطوار الشيفرة وأطوار الموجة الحاملة، تعطينا أشباه أطوال بين هوائيات لواقط وبين عدد من الأقمار الصناعية. الفرق الأساسي بين نوعي القياسات هو ما يدعى حد الغموض في المعادلتين *4.34, 4.42*.

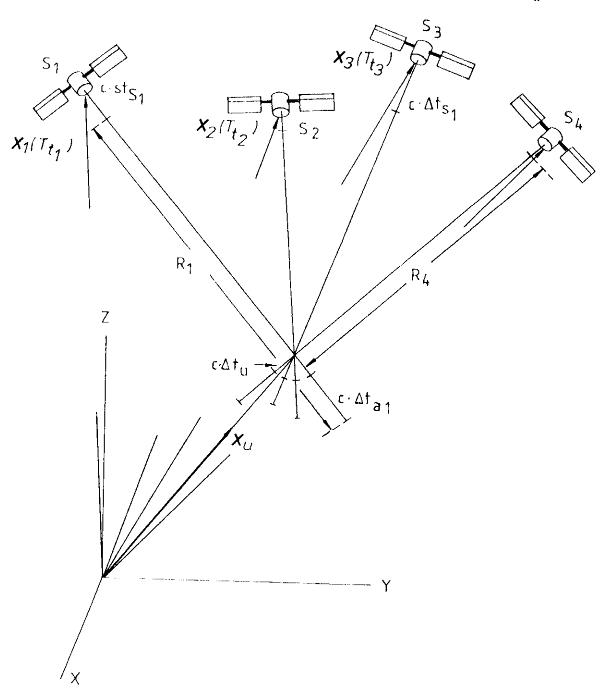
هناك طريقتين لمعالجة مشكلة الغموض *ambiguity*:

1– كل الإنحرافات *biases* (أخطاء نظامية في القياسات) التي تملك خواص ثابتة وواضحة يتم تقديرها سويا مع مجاهيل محطات الرصد كعوامل تشويش او وسائط إنحراف (مثلا تصحيحات لمسارات الأقمار، وسائط الساعة، حدود الغموض وعوامل المقياس المتعلقة بالظروف الجوية *troposphere*). يمكن أن تقاس هذه الإنحرافات مباشرة بواسطة قياسات إضافية أو تكون مضمّنة بعملية تعديل واسعة.

2– يتم إلغاء أغلب الإنحرافات *biases* بواسطة تشكيل التفاضل بين القياسات. يفترض أن حدود أخطاء القياسات مرتبطة خطيا الواحد بالآخر في مجموعات القياسات المتعددة. وهذا يصح حتى درجة معينة (مثلا أخطاء الساعة والمدار والغموض). تستخدم التفاضلات الوحيدة، الثنائية والثلاثية لقياسات أطوار الموجة ككميات مقاسة مشتقة. يستخدم هذا المفهوم مبدئيا في القواعد بين محطتين أرضيتين.

من فوائد الطريقة الأولى طواعيتها وإستقلاليتها عن شرط القياسات المتزامنة بين المحطات المشاركة بالقياسات. هنا تعيّن إحداثيات النقاط مباشرة ويمكن التحكم ببعض الوسائط مثل وسائط الساعة. المفهوم الثاني (مفهوم خط القاعدة *baseline*) قدمه إختصاصيون في *VLBI* (فقرة *1.4.1*). فائدته الرئيسية هي أن أغلب تأثيرات الأخطاء تحذف بواسطة التفاضل، وهذا يسهّل عملية تقدير المجاهيل. في حالة أطوال القواعد الكبيرة لاتعطي عملية الحذف نتائج دقيقة ويصبح من غير الممكن تثبيت قيمة مجهول الغموض *ambiguity* إلى قيمة صحيحة. يمكن في هذه الطريقة أيضا إختزال عدد القياسات المستقلة خطيا بشكل كبير.

يتبع مبدأ التوضع بواسطة ال *GPS* في طرق تقدير الوسائط العلاقتين المبسطتين *4.34, 4.42* (شكل *4.25*).



شكل *4.25*: وسائط الحل الرئيسية في التوضع بواسطة أشباه الأطوال.

يمثل هنا T_{ti} لحظة إرسال الإشارة من هوائي القمر في مقياس الزمن المعين للقمر S_i. علاقة هذا الزمن مع زمن نظام ال *GPS*:

$$T_t = T_{t_i} - dt_{s_i} \qquad 4.59$$

القياسات هي:

t_r اللحظة الزمنية لإلتقاط الإشارة في إطار اللاقط الزمني

T_{ti} اللحظة الزمنية لإرسال الإشارة في الإطار الزمني للقمر SV_i

القيم المعلومة هي:

$X_i(T_t)$ إحداثيات القمر الصناعي SV_i في اللحظة الزمنية T_t في نظام زمن ال *GPS* المرجعي.

ويكون شعاع الوسائط أو المجاهيل في معادلة الرصد الخطية:

$$X = \left(X_u, Y_u, Z_u, dt_u\right) \qquad 4.60$$

يمكن أن تحتوي المعادلة على وسائط (مجاهيل) إضافية للحصول على معادلة رصد معقدة ومتطورة. تلك الوسائط الإضافية يمكن أن تكون:

3 إنحرافات للساعة في كل محطة، *3* إنحرافات للساعة في كل قمر صناعي، *6* إنحرافات مدارية لكل قمر، مجهول واحد من أجل ضغط الإشعاع الشمسي *solar radiation pressure* (فقرة *3.2.6*)، مجهول واحد من أجل الظروف الجوية *troposphere* لكل زوج محطة–قمر، مجهول واحد لحد الغموض لكل زوج محطة–قمر.

يمكن وصف تصرف الساعة بواسطة كثير حدود (فقرة *4.5.3*)، حيث تمثّل حدوده إنحراف الساعة وتغيراته مع الزمن (*bias, drift, ageing*).

$$dt_u = a_{0u} + a_{1u}(t - t_0) + a_{2u}(t - t_0)^2$$
$$dt_s = a_{0s} + a_{1s}(t - t_0) + a_{2s}(t - t_0)^2. \qquad 4.61$$

ويمكن توسيع معادلة الرصد وإضافة مجاهيل إضافية حسب الضرورة.

تشكّل الوسائط المجهولة في شعاع المجاهيل X بينما القياسات في شعاع القياسات *PR*. تكون عندها معادلة الرصد بشكلها الخطي:

$$\mathbf{l} = \mathbf{PR} - \mathbf{PR}(\mathbf{X}_0). \qquad 4.62$$

حيث X_0 شعاع القيم التقريبية للوسائط المجهولة، و l شعاع القياسات المختزلة. وبإعتبار

$$\mathbf{x} = \mathbf{X} - \mathbf{X}_0 \qquad 4.63$$

يكون لدينا

$$\mathbf{l} = \mathbf{A}\mathbf{x}. \qquad 4.64$$

حيث A المصفوفة التصميمية وتحتوي على المشتقات الجزئية للقياسات بالنسبة للمجاهيل:

$$\mathbf{A} = (\partial\mathbf{PR}/\partial\mathbf{X}). \qquad 4.65$$

شعاع الحل يكون عندها

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{l}. \qquad 4.66$$

بإعتبار ε_r تشويش قياسات أشباه الأطوال فإن أخطاء المجاهيل المعدّلة توجد بالعلاقة

$$\epsilon_x = \mathbf{A}^{-1}\epsilon_R. \qquad 4.67$$

نكتفي بهذا العرض عن طريقة الإستثمار. تفاصيل عن طرق التعديل موجودة في المراجع المختصة المتوافرة.

في حال إستخدام الطريقة *2* المذكورة لتقدير المجاهيل يتم تشكيل تركيبات مختلفة لتفاضلات *differences* كما رأينا في الفقرة *4.9.1*. إن تشكيل التفاضلات يؤدي لنتائج يجب أخذها بعين الإعتبار أثناء معالجة المعطيات، تذكر هنا أهم الأوجه بإختصار:

– الإرتباط الرياضي *algebraic correlation* الناتج من التفاضل يجب أخذه بعين الإعتبار في التعديل الدقيق. يجب تجديد مصفوفة التباين في حال إزدياد عدد اللواقط وأنماطها.

– أهمية الإنتخاب المسبق للتفاضل *pre-selection of differences* في حال كون عدة أقمار ولواقط مشتركة في جلسة القياسات المتزامنة *Session*، وذلك لأن قسما فقط من التفاضلات الممكنة يكون مستقل. إحدى الطرق الممكنة هي تعيين قمر مرجعي ومحطة مرجعية وإعتبارهما في كل التفاضلات. يمكن أن تنشأ هنا صعوبات في حال حدوث قفزات قياسات *cycle slips* في قياسات القمر أو المحطة المرجعيين.

– القياسات المستخدمة بإنشاء التفاضل يجب أن تكون متزامنة *identical observation epochs*. في حال إستعمال لواقط مختلفة الأنواع وبالتالي تسجّل القياسات بأزمنة مختلفة فيصار إلى إيجاد القياسات المتزامنة بواسطة برامج الإستكمال *interpolation*.

4.9.3 حل الغموض *Solution of Ambiguities*

تتأثر قياسات طور الموجة الحاملة *carrier phase observations* بظاهرة الغموض *ambiguity* وهي العدد المجهول *N* لأطوال الموجات الكاملة بين هوائي القمر وهوائي اللاقط. يجب أن يكون الغموض الأولي *initual ambiguity* معينا بطرق ملائمة للحصول على إمكانية الدقة العالية الكاملة لقياسات أطوار الموجة في نظام ال *GPS*. إن تعيين حد الغموض *N* هو إحدى أهم المسائل الملحّة في الطريقة الجيوديزية لمعالجة قياسات ال *GPS*. ومن جهة أخرى فإن طبيعة العدد الصحيح لغموض الطور يضمن دقة عالية في التعيين النسبي بواسطة نظام ال *GPS*. إن أفضل وأسهل طريقة لتعيين الغموض يمكن أن تكون إستخدام تردد إضافي أو إشارة إضافية كما هو الحال في قياس المسافات الإلكترونية الأرضية. إن نظام ال *GPS* لايؤمّن، لسوء الحظ، سوى ترددين، لذلك فقد تم تطوير طرق خاصة لحل مشكلة الغموض. أهم الطرق هي: الطريقة الهندسية *geometric method*، تركيبات من الشيفرة وطور الموجة الحاملة *code and carrier phase combinations*، طرق البحث عن الغموض *ambiguity search methods* وطرق مركّبة *combined methods*.

تستخدم الطريقة الهندسية *geometric method* التغيّر بالشكل الهندسي بين اللاقط والقمر مع الزمن *satellite geometry*. تستخدم بشكل عام قياسات الطور المتواصلة ويتم تعيين الغموض كعدد حقيقي. عندما يتم التعرف على القمر في اللاقط يبدأ عدّ العدد الكامل لأطوال الموجات الواصلة. يبقى الغموض الأولي *initual ambiguity* مجهولا وثابتا أثناء القياسات. ينتج الرصد المتواصل لأطوار الموجة الحاملة فروقات في الأطوال (مع الزمن) محرّرة من الغموض. تستعمل تلك الفروقات بحل دوبلر *Doppler* لتعيين إحداثيات هوائي المستعمل (فقرة *1.4.3*). يمكن بعدها إشتقاق أشباه الأطوال المحرّرة من الغموض من نتائج حل دوبلر ومقارنتها مع القياسات المتأثرة بالغموض. يتم إشتقاق قيم الغموض مباشرة من خلال هذه المقارنة.

تستخدم هذه الطريقة في حال توفر تغيّر كاف للتوزع الهندسي بين القمر والمحطة وهذا يعني خلال زمن قياس طويل. في هذه الطريقة يجب المحافظة على رصد متواصل لأربع أقمار خلال فترة الرصد. إن حدوث قفزات قياسات *cycle slips* (إنقطاع في عملية تسجيل القياسات) يتطلب إضافة مجهول غموض إضافي. تملك حدود الغموض المقدّرة قيما حقيقية يمكن تقريبها إلى أقرب عدد صحيح (بأخذ إعتبارات ملائمة). في حال تواجد عدد أكبر من الأقمار، أو كان تغير التشكل الهندسي للأقمار جيدا أو إذا تم إستخدام طول موجة أطول (مثلا تركيب خطي للقياسات) فإن فترة القياس المطلوبة تكون أقصر. تعطي هذه الطريقة نتائجا جيدة من أجل المسافات القصيرة. تظهر الصعوبات عند تواجد أخطاء نظامية غير محسوبة أو مقدّرة متبقية في القياسات (تروبوسفير، إيونوسفير، أخطاء المدار). تزداد تأثيرات هذه الأخطاء بإتساع المسافة بين محطات الرصد ويصبح من الصعب وحتى مستحيل حل مسألة الغموض بشكل موثوق. إن تعيينا خاطئا لحدّ الغموض يسبب أخطاء نظامية في الإحداثيات المستنتجة.

هناك طريقة هندسية أخرى تدعى تابع الغموض *ambigtuity function*، تستخدم فيها الفروقات الوحيدة *single differences* بين محطتين، حيث تعتبر إحداثيات إحداهما معروفة. هنا تكون الوسائط المجهولة هي فقط إحداثيات المحطة الثانية وفروقات في أخطاء ساعة اللاقط. يتم تعريف طريقة للبحث، حيث يتم تغيير شعاع القاعدة حتى تتطابق الفروقات المحسوبة مع المقاسة بشكل جيد. للطريقة الهندسية الفوائد التالية:

واضحة وسهلة التنفيذ، تعمل مع أقمار جديدة (إستقبال أقمار جديدة أثناء الرصد)، تستخدم من أجل المسافات القصيرة، المتوسطة والطويلة، يعطي حل الغموض الحقيقي (الغموض بقيمه العددية الحقيقية) نتائجا تقريبية سريعة. وللطريقة المساوئ التالية:

تتطلب فترة قياس طويلة لتأمين تغيّر هندسي كافي لتوزع الأقمار ، تتأثر بعوامل غير مقدّرة مثل الإيونوسفير *ionosphere* والتروبوسفير *troposphere* وأخطاء مدار القمر *orbit errors*، عدم الإستفادة المسبقة من طبيعة العدد الصحيح لحد للغموض، حساسية الطريقة لقفزات القياسات الغير مصحّحة.

الطريقة الثانية لحل مسألة الغموض هي التركيب بين الشيفرة وطور الموجة الحاملة *combination of code and carrier phase*. تستعمل قياسات الشيفرة الغير خاضعة للغموض كطول موجة إضافي لحل غموض طور الموجة الحاملة

$$PR_{CR} - PR_{CD} = \lambda N + dT_A + d\epsilon. \qquad 4.68$$

هذه الطريقة مستقلة عن التوزع الهندسي للأقمار والمحطات. يحتوي الفرق بين القياسين على الأخطاء المتبقية *residual* dT_A *errors*. الفكرة الأساسية هي الحصول على قياسات الشيفرة حتى التوصل لتشويش *noise level* في نتائج حل الشيفرة قيمته أقل من نصف طول الموجة الحاملة. من الواضح أن هذه الطريقة تتطلب لواقط ذات قياسات شيفرة بتشويش متدني، وهذا ممكن فقط بلواقط ذات الشيفرة الدقيقة *P/Code*. رغم ذلك فمن الصعب حل الغموض للإشارات الأصلية L_1 و L_2 بسبب الأطوال القصيرة لموجاتهما. يستخدم عوضا عن ذلك التركيب الخطي للإشارتين والمسمى L_5 المجال الواسع *Wide Lane* ذو طول الموجة المساوي ل *86.2 cm* (فقرة *4.9.1*).

إن الحد dT_A في العلاقة *4.68* يحتوي فروق تأخيرات إنتشار كلا النوعين من الإشارات والمسببة من قبل عناصر بناء *hardware* القمر الصناعي واللاقط، وكذلك بسبب تأثير عوامل تعدد طرق الإشارة *multipath effects* (فقرة *4.14.4.3*). الطريقة مستقلة عن التوزع الهندسي للأقمار وعن ساعات القمر واللاقط. يمكن الحصول على حلول الغموض بعد فترة قياسات قصيرة جدا تبلغ عدة دقائق أو أقل. لذلك تستخدم الطريقة أيضا في المسافات الواسعة وبالطرق الحركية *kinematic methods*.

بعد حل الغموض من أجل القياس L_5 يمكن إستخدام الطريقة الهندسية لحل الغموض من أجل القياسات الأخرى، وذلك في حال كون تأثير الإيونوسفير قد تم حسابه، مثلا حساب الغموض لإشارة L_3 أو لإشارة L_Σ (فقرة *4.9.1*).

فوائد الطريقة: مستقلة عن التوزع الهندسي للأقمار واللواقط، تطبيقات حركية، يمكن حل القواعد الطويلة والطويلة جدا. ومساوئ الطريقة هي: لاقط ثنائي التردد ذو *P/code* ضروري، حساسية الطريقة لتأثير تعدد طرق الإشارة *multipath* (*4.14.4.3*)، يتم بهذه الطريقة حل غموض التركيب الخطي L_5 فقط.

تم تطوير طريقة البحث عن الغموض *ambiguity search methods* بإختصار زمن الرصد في المحطة. الفكرة الأساسية هي البحث عن تركيب مثالي للغموض في الإشارتين L_1, L_2 أو إشارات أخرى مشتقة. تعمل الطريقة بشكل أفضل بتوافر أقمار أكثر. يبدأ البحث عادة بحل الغموض كعدد حقيقي ويحدّد شعاع الحل لتمييز قيم صحيحة بواسطة تطبيق طرق إنتخاب *optimization*. يتم فحص التركيبات الممكنة ضمن مجال غموض معرّف *pre-defined*. المشكلة الأساسية هي إزدياد عدد العمليات الرياضية الضرورية بغزارة. بإعتبار *n* عدد أطوال الموجة أو الدورات *cycles* في مجال البحث و *m* عدد حدود الغموضات المطلوب إيجادها، فإن الجدول *4.6* يبين عدد العمليات الضرورية لثبيت الغموض في كل التركيبات الممكنة.

n\m	1	3	10	20
4	1,620	48,020	$3.9 \cdot 10^6$	$5.6 \cdot 10^7$
8	$4.7 \cdot 10^5$	$4.1 \cdot 10^8$	$2.7 \cdot 10^{12}$	$5.7 \cdot 10^{14}$
20	$1.5 \cdot 10^{12}$	$3.3 \cdot 10^{19}$	$1.1 \cdot 10^{29}$	$7.5 \cdot 10^{34}$

جدول *4.6*: عدد العمليات الضرورية لثبيت الغموض في كل التركيبات الممكنة.

فوائد الطريقة:

– تسمح بحل مسألة الغموض بسرعة (مثلا في حال التطبيقات الساكنة السريعة *rapid static*)

– التطبيقات الحركية الخالصة *kinematic applications* ممكنة

– تستفيد من طبيعة العدد الصحيح للغموض.

مساوئ الطريقة:

– حساسية ضد الأخطاء النظامية

– تتطلب قياسات من أقمار كثيرة قدر الإمكان.

الطرق المختلطة *combined methods* تتألف من تركيب كل الطرق المذكورة، ويتوجب أن تعطي أحسن النتائج. الفكرة الأساسية هي أن كل حد غموض محسوب ومثبّت (كعدد صحيح) يحسّن ويوازن الحل لمرحلة التقريب المتتالي *iteration* اللاحقة. يكون تعيين الغموض في المسافات القصيرة أسهل منه في المسافات الطويلة. لذلك يتم اللجوء لإتخاذ قواعد صغيرة ضمن الشبكات الكبيرة، حيث يتم البدء بتعيين الغموض على تلك القواعد كمرحلة أولى.

إضافة لذلك هناك طرق تم تطويرها لتعيين الغموض بسرعة من أجل التطبيقات الحركية *kinematic surveys*. إحدى هذه الطرق هي طريقة تبادل الهوائيات *antenna swapping*. حيث يتم تبديل هوائيي لاقطين على قاعدة قصيرة جدا (عدة أمتار) قبل البدء بعملية المسح الحركي (شكل *4.27*).

إن حل مسألة الغموض يعتبر عاملا حاسما في المسح الدقيق بواسطة ال *GPS*. في حالات متعددة، وخاصة في المسافات القصيرة، وفي حال توفر قياسات من نوعية جيدة فإن حل الغموض *ambiguity resolution* يجري بشكل مرض في البرامج المرافقة للأجهزة المستعملة بالقياس.

الحالات التي يمكن أن تظهر بها مشاكل بحل الغموض:

– المسافات أكبر من *10 km* والدقة المطلوبة لاتتجاوز ال *1 cm*

– نوعية القياسات سيئة (مثلا بسبب تأثير تعدد طرق الإشارة، أو قفزات في القياسات *sycle slips*، فقرة *4.10.1*)

– عدد أقمار قليل (≤ 4)

– الإيونوسفير المضطربة *disturbed ionosphere*

– زمن رصد أقصر من *30 min*.

في هذه الحالات فإنه يجب التدخل بمعالجة المعطيات (تفحّص القياسات والتأمّل بها بشكل فردي لكل قاعدة) وإستخدام برامج تعديل متعددة الأغراض. إن إستثمار البرامج وإستخدام الطرق المختلفة المشروحة بشكل موجز يتطلب عادة خبرة علمية مدرّبة. من أجل فترة قياس طويلة (عدة ساعات أو أيام) وخاصة بعد أن أصبحت تغطية الأقمار الصناعية أعظمية، فإن الحل الحقيقي للغموض *ambiguity float solution* (قيم حقيقية) يعطي نتائج جيدة حتى على مسافات طويلة ولاضرورة عندئذ لحل الغموض وتثبيته إلى عدد صحيح.

4.10 معالجة المعطيات *Data Handling*

4.10.1 قفزات القياسات أو القياسات المفقودة (*Cycle Slips*)

تحدث قفزات القياسات إذا فقد اللاقط الإتصال بطور موجة إشارة القمر. يعود ذلك إلى أسباب منها متعلقة بالقياسات مثل:

– وجود عوائق بطريق الإشارة وخاصة في حالة القياسات الحركية *kinematic*

– تشويش الإشارة وخاصة المسبّبة من طبقة الإيونوسفير *ionosphere* (ظاهرة الومضان *scintillation*، فقرة *4.14.4.1*)، ومن ظاهرة تعدد طرق الإشارة *multipath* (فقرة *4.14.4.3*)

– زاوية إرتفاع منخفضة للقمر تسبب وصول إشارة ضعيفة.

ومنها متعلق باللاقط مثل:

– إشارات ضعيفة، تداخل الإشارة يؤثر بذلك تأثيرا جزئيا

– ميلان اللاقط في التطبيقات الحركية

– معالجة الإشارة في أجهزة اللاقط.

يظهر طور الموجة الحاملة قفزات فجائية بمقدار عدد صحيح من الدورات *cycles* أو أطوال الموجة ($1\ Cycle = 2\pi$). يمكن أن يترواح مقدار القياس المفقود (*cycle slip*) بين الدورة الواحدة أو عدة دورات *cycles* والملايين منها. إنما فرق مفاجئ بالطور بمقدار $180°$ ينتج عن عطل في دارة الرصد في اللاقط.

يتم أثناء عملية المعالجة حذف تلك القفزات، أو يجب إضافة مجهول غموض جديد في كل مرة وتعيينه. يتم إكتشاف قفزات القياسات بسهولة إذا تم تشكيل التفاضلات الثنائية والثلاثية (فقرة *4.9.1*). وتعتبر تلك الطريقة من الطرق المبكرة والتقليدية لمعالجة قفزات القياسات.

هناك عمليتين هامتين في مرحلة المعالجة: إكتشاف القفزات، وتثبيتها (إصلاحها).

تملك أغلب الأجهزة الحديثة إمكانية التعرف على أغلب القفزات أثناء تسجيل القياسات وتزوّد مجموعة المعطيات المتأثرة بدليل أو إشارة *flag* تدلّ على حدوث القفزه والتي تساعد كثيرا أثناء الإستثمار.

4.10.2 شكل القياسات المستقل عن اللاقط *Receiver Independent Data Format*

يملك كل نمط من أنماط اللواقط شكل معطيات ثنائي *binary* خاص به. وتعرّف الكميات المقاسة وفق مفاهيم الجهة الصانعة. يمكن أن تعرّف الإشارات الزمنية في زمن اللاقط أو في زمن الإنتشار *transmission time*، ويمكن أن يعبّر عن قياسات الطور بواحدة الدورة الكاملة *cycle* أو جزء منها، يمكن أن تحتوي الشيفرة والطور إشارات زمنية *time tags* منطبقة أو مختلفة، أو يمكن أن ترصد الأقمار الصناعية بالتزامن أو بأوقات غير متطابقة. كنتيجة لذلك فلايمكن لقياسات من أجهزة مختلفة أن تعالج في برنامج إستثمار واحد. لذلك توجّب تطوير طريقة لتبادل القياسات المختلفة الأشكال *Format* على الصعيد الدولي وذلك بإيجاد شكل موحّد للقياسات لتسهيل هذا التبادل. تم تطوير هذا الشكل في معهد الفلك في جامعة *Bern* ويدعى الشكل المستقل عن اللاقط *RINEX Receiver Independent Data Format*. تم تبنّي هذا الشكل من قبل المستخدمين وكذلك من قبل مجموعة مصنعي الأجهزة الدولية، حيث أن أغلب الأجهزة مزودة ببرامج لتحويل شكل القياسات المرصودة إلى الشكل الجديد بهدف التبادل. يعرّف هذا الشكل *RINEX* ثلاثة كميات مقاسة أساسية وهي

زمن القياس *Time*: وهو زمن اللاقط للإشارة الملتقطة، وهو متطابق بالنسبة لقياسات الطور والشيفرة ومنطبق لكل الأقمار المرصودة في تلك اللحظة الزمنية، وهو يعبّر عن زمن النظام *GPS* وليس الزمن العالمي *UT*.

شبه الطول *pseudo-range*: ويمثل البعد بين هوائيي اللاقط والقمر، ويتضمن أيضا إنحرافات ساعتي القمر واللاقط.

طور الموجة الحاملة *Phase*: مقاسة بواحدة الدورة الكاملة *Cycles* على كل من الإشارتين L_1, L_2.

يتألف الشكل المستقل عن اللاقط *RINEX* من ثلاث ملفات *files* من نوع *ASCII*:

1– ملف معطيات القياسات *Observation Data File* ويحتوي على المعلومات الأولية العامة *Header Informations* وعلى قياسات الطور والشيفرة

2– ملف المعطيات الجوية *Meteorological Data File*

3– ملف الخبر الملاحي *Navigation Message File*.

يحتوي كل ملف على قسمين، قسم المعلومات الأولية *Header Informations*، وقسم القياسات.

تتواصل التعديلات والتحسينات على هذة الفورمات *Format* بسبب الأخذ بعين الإعتبار الطرق الجديدة المتطورة (المعطيات الساكنة السريعة *rapid static*، المعطيات الحركية *kinematic*) وتغيرات تقنية في النظام *GPS* (ضد التشويش *Anti-Spoofing AS*، طرق تربيع الإشارة *Squaring*).

4.11 طرق التعديل ومفاهيم برنامج الإستثمار *Adjustment Strategies and Software Concepts*

تدعى كل القياسات المتزامنة خلال فترة قياس في مشروع *GPS* فترة تسجيل (دورة أو جلسة) *session*. يمكن أن تتراوح الفترة بين عدة دقائق (في حال وجود إمكانية تطبيق الطرق السريعة لحل الغموض في الشبكات الصغيرة)، أو عدة ساعات (في حال العمل للحصول على دقة عالية في الشبكات الكبيرة).

تستعمل طرق الرصد والحل التالية:

تعديل محطة وحيدة *single station adjustment*

معالجة خطوط قواعد فردية *single baselines* وتركيبات لاحقة لقواعد أخرى في الشبكة

معالجة كل القياسات المرصودة بشكل متزامن خلال فترة قياس واحدة والقيام بتعديلها معا *multi-station adjustement*

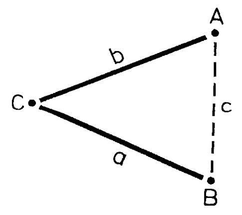
تركيب حلول فترات قياسات متعددة ضمن حل شامل للشبكة *multi-session solution*.

– إن تعديل محطة وحيدة *single station adjustment* يعطي إحداثيات محطة في النظام المرجعي *WGS84*. نظرا للدقة المنخفضة (تعيين مطلق) فإن النتائج لاتهمنا كثيرا من أجل التطبيقات الجيوديزية، ولكنها تفي بأغراض بعض المهام في الجيوفيزياء أو الإستشعار عن بعد. المجال التقليدي لهذه الطريقة هو الملاحة.

– تتطلب عملية التعديل الدقيقة معلومات مطلقة ونسبية، لذلك فإن برامج معالجة المحطات المتعددة *multi station processing* تحتوي أيضا على حل المحطة الوحيدة *single station solution*. يستعمل أيضا تعديل المحطة الوحيدة من أجل المعالجة المسبقة وتنقيح المعطيات (قفزات القياس، دوران الأرض، تأثير النسبية، الإيونسفير، تروبوسفير وإيجاد إحداثيات للنقاط)، وذلك قبل الدخول في مرحلة تعديل المحطات المتعددة *multi station processing*. يمكن الحصول على مواضع دقيقة للنقاط (بحدود عدة امتار) بإستخدام فترة قياسات طويلة (أيام) أو بإستخدام معطيات دقيقة لمدار الأقمار.

– في طريقة القاعدة الوحيدة *single baseline concept*، تتم معالجة القياسات المتزامنة على لاقطين ضمن تعديل واحد، وغالبا في حالتها التفاضلية الثنائية. كنتيجة نحصل على مركّبات شعاع القاعدة $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ ومصفوفة التباينات المتعلقة بها *covariance matrix*.

تستعمل القواعد المعالجة كمعطيات إدخال في برنامج تعديل الشبكة. يجب فقط معالجة القواعد المستقلة في الشبكة. بإعتبار أن r عدد اللواقط المستخدمة في القياسات يكون $r(r-1)/2$ عدد القواعد الممكن تشكيلها و $r(r-1)$ عدد القواعد المستقلة في شبكة *GPS* (شكل *4.26*).



شكل *4.26*: قواعد مستقلة a,b وغير مستقلة c في حال إستخدام ثلاث لواقط متزامنة.

– في طريقة التعديل المتعدد القواعد *multi station adjustement* تتم معالجة القياسات المتزامنة للّواقط المشاركة (ثلاثة أو أكثر)، لايتم هنا تعيين خطوط قاعدة *baselines* كما في الطريقة السابقة إنما إحداثيات نقاط الشبكة ومصفوفة تبايناتها. يفضل إستعمال هذه الطريقة في التطبيقات الجيوديزية لأنها تستفيد من إمكانية الدقة المرتفعة لنظام ال *GPS* بشكل كامل، وترفع موثوقية *reliability* النتائج. في حال كون القياسات تعود إلى فترة قياس *Session* واحدة يسمى الحل عندها حل الجلسة أو حل فترة القياس *session solution*.

– يمكن إدماج حلول جلسات متعددة في عملية تعديل تدعى تعديل متعدد الجلسات *multi-session-adjustment* أو بتعبير أصح حل متعدد الجلسات والمحطات *multisession-multistation solution*. الشرط الأساسي هنا هو كون كل فترة قياس مرتبطة مع فترة قياس أخرى على الأقل من الشبكة بواسطة محطة أو أكثر تم القياس فيها في كلا الجلستين. كلما كان عدد النقاط المشتركة أكبر تزداد ثبوتية وموثوقية حل الشبكة النهائي. في حال توافر قياسات فائضة في المحطات المشتركة فإن مقارنة نتائج الجلسات *sessions* الفردية يعتبر فحصا وتدقيقا لدقة الشبكة.

تعتمد برامج الإستثمار الحديثة في ال *GPS* على طريقة تعدد الجلسات والمحطات *multisession-multistation*. ويمكن تمييز مجموعتين من برامج الإستثمار *Softwares*، البرامج التجارية *commercial softwares* المرافقة لأجهزة اللواقط، والبرامج العلمية *scientific softwares* الموضوعة من قبل معاهد الأبحاث العلمية.

– البرامج التجارية مصمّمة بالدرجة الأولى لمعالجة معطيات اللاقط المعين المتعلق بها. تسمح البرامج التجارية المتطورة حاليا بمعالجة معطيات من أجهزة أخرى مختلفة أيضا، وذلك عن طريق شكل المعطيات *RINEX Format* المذكور (فقرة *4.10.2*). تكفي البرامج التجارية لعمليات المسح اليومية الإعتيادية وتعطي عادة عدد محدود من الخيارات ، ويمكن إستعمالها من قبل أشخاص ذوو معرفة متوسطة بالهندسة وبتقنية نظام ال *GPS*. تحتوي تلك البرامج في بعض الأحيان على تعديل خطوط القواعد *baseline adjustement*، ويلزم برامج إضافية أخرى لحسابات الشبكة (والحصول على إحداثيات معدلة). تسمح عادة تلك البرامج بالتطبيقات الساكنة *static* والحركية *kinematic* وتحوي على إمكانية التخطيط المسبق للقياس *mission planning*. أمثلة على البرامج التجارية المنتشرة في الأسواق: *Static Kinematic Software SKI* لشركة *Leica*، *GPSurvey* لشركة *Trimble*، *PRISM* لشركة *Ashtech* و *Geotracer* لشركة *Geotronics*.

– إن تطوير مجموعة برنامج *Package* متعدد الأغراض لمعالجة معطيات ال *GPS* هو عملية ضخمة، فهو يحتاج إلى سنوات طويلة من العمل و يحتوي على عدد كبير من البرامج الفردية. لا تكون عادة مجموعة البرامج تلك مقتصرة على نوع معين من اللواقط إنما تقبل معطيات من عدد كبير من أنماط أجهزة الإستقبال الجيوديزية المختلفة. تؤمن تلك البرامج الإمكانيات التالية:

الإستخدام النظامي المحترف في الشبكات الصغيرة من أجل المعالجة السريعة *rapid processing*

الإستخدام المحترف في المسح العالي الدقة وأيضا على مسافات واسعة

تحليل المعطيات وفحوصات علمية، منها الأبحاث الجيوديناميكية.

إضافة للمعالجة السريعة فإن تلك البرامج تؤمّن إختيارات متعددة للمعالجة العلمية. يلعب تدخّل مستثمر البرناج الشخصي هنا دورا جوهريا. تتطلب المعالجة العلمية الكثير من الخبرة وفهم عميق لإشارات النظام *GPS signals* وتصرّف الأخطاء.

تكون معالجة المعطيات صعبة في حال كونها متأثرة بتشويش طبقات الإيونوسفير وكذلك في حال الرغبة في الحصول على دقة عالية على مسافات كبيرة بواسطة قياسات مشوّشة. تكون الطرق الرياضية المستخدمة في تلك البرامج عادة مشروحة بالتفصيل في منشورات علمية. هنا بعض الأمثلة عن تلك البرامج العلمية:

برنامج جامعة *Bern* السويسرية *BERNESE GPS Software*، برنامج جامعة *New Brunswick* الكندية *DIPOP*، برنامج جامعة *Hannover* الألمانية *GEONAP*، برنامج مخبر *Jet Propultion Laboratory* الأمريكي *GIPSY* و برنامج جامعة القوات المسلحة الألمانية في ميونيخ *TOPAS*.

تتألف مجموعة برنامج متعدد الأغراض *multi -purpos software Package* من أقسام رئيسية هي:

– مرحلة المعالجة المسبقة للمعطيات لتحضير المعطيات للمعالجة الرئيسية

– مرحلة المعالجة الرئيسية لتقدير الوسائط المجهولة

– مرحلة مابعد المعالجة لتلخيص المعلومات المختلفة في جداول أو بشكل رسوم بيانية وإدماج حلول الجلسات في حل شبكة عند الضرورة.

4.12 مفاهيم طرق القياس السريعة بواسطة *GPS* *Concepts of Rapid Methods with GPS*

4.12.1 إعتبارات أساسية *Basic Considerations*

تم في السنوات الأخيرة تطوير عدة طرق للإستفادة من إمكانية نظام ال *GPS* بالحصول على إحداثيات دقيقة بعد فترة قياس وجيزة، أو خلال حركة اللاقط (مع الهوائي) في مسار ما. هناك إمكانيات مختلفة لتقسيم الطرق السريعة: الطرق الساكنة السريعة *rapid static*، الطرق نصف السريعة *stop and go* والطرق الحركية *kinematic*. الفكرة من هذه التسميات هي فيما إذا كان اللاقط أثناء حركته في مساره يقوم بتسجيل القياسات والحصول على إحداثيات (*kinematic mode*)، او أنه يصار إلى قطع التغذية الكهربائية (إطفائه) أثناء نقله إلى النقاط اللاحقة ويقوم فقط بتسجيل القياسات عند توضعه بشكل ساكن فوق النقطة المعتبرة (*rapid static*). هناك طريقة تجمع الطريقتين معا وهي ترك اللاقط يعمل على تسجيل القياسات أثناء تنقله ولكن لايتم حساب إحداثيات لنقاط مساره (*semi-kinematic mode*).

إضافة لذلك يمكن التمييز بين الطريقتين الساكنة والحركية على أساس الدقة المتوخاة منهما. ففي المسح الساكن *static survey* تترسب أخطاء القياسات العشوائية في المتبقيات (أو التصحيحات) *residual* بعد التعديل، بينما في الطريقة الحركية تبقى تلك الأخطاء في الإحداثيات الناتجة، وهذا هو سبب عدم تمكن الطرق الحركية من التوصل إلى دقة الطرق الساكنة.

يجب في كل التطبيقات الجيوديزية توافر لاقطين على الأقل لتعيين إحداثيات نسبية. في حالة الطرق السريعة فإن أحد اللواقط يبقى خلال فترة الرصد مثبتا على نقطة معينة، بينما يقوم اللاقط الآخر *rover* بالتنقل بين النقاط الأخرى أو وفق مسار معين.

4.12.2 الطرق الساكنة السريعة *Rapid Static Methods*

وهنا يمكن تمييز طريقتين:

– الطريقة الساكنة السريعة بإشغال (تمركز) واحد للمحطة

– الطريقة الساكنة السريعة بإشغال ثاني للمحطة بعد فترة ساعة من التمركز الأول.

في الطريقة الأولى يجب إستخدام الطرق السريعة المشروحة سابقا لتعيين الغموض. تعتبر فترة قياس لغاية *15* دقيقة كافية. في حال إستخدام لواقط ذات تشويش شيفرة منخفض *low noise P-code* (مثلا *Rogue* أو *Trimble SSE*) فإن هذه الطريقة جيدة جدا.

في الطريقة الثانية يجب الوقوف على كل نقطة مرتين بفاصل زمني يتراوح بين *50* و *120* دقيقة، ويلزم هنا فترة قياس قصيرة في كل مرة تتراوح بين *4* و *8* دقائق. الهدف من ذلك هو الإستفادة من تغير التوزع الهندسي للأقمار لإستخدام

القياسات لحل الغموض. في المرة الثانية يجب أن ترصد نفس الأقمار كما في المرة الأولى، وتكون المعطيات ذات نوعية جيدة. هناك أيضا أسماء أخرى تطلق على هذه الطريقة مثل شبه الحركية *pseudo kinematic*، الساكن المتقطع. *brocken-static, intermittent static*... .

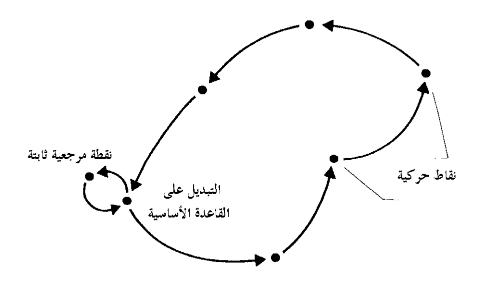
4.12.3 الطرق نصف الحركية *Semi Kinematic Methods*

تدعى أيضا طريقة المسح بالتوقف والذهاب *stop and go surveying* أو المسح الحركي *kinematic surveying*. الفكرة تقول بأنه لافرق بين طرق المسح الحركي والساكن إذا كانت حدود الغموض معروفة ومحافظ عليها. يمكن إذا إعتبار المسح الحركي كعملية نقل حد الغموض المعروف من محطة إلى أخرى. في المسح نصف الحركي أو بالتوقف والذهاب *stop and go* يتم وضع الهوائي على النقطة المطلوب إحداثياتها لفترة قصيرة (من ثوان إلى دقائق). هذا الزمن هو الزمن اللازم للتعرف على النقطة والتوقف بشكل عمودي عليها وليس الزمن اللازم لجمع قياسات كافية. الطريق بين النقاط ليس له أهمية ولكن يجب أن يتم الحفاظ على الإتصال مع أربعة أقمار صناعية على الأقل أثناء عملية نقل الهوائي بين النقاط. المسألة الأساسية هي تعيين غموض الطور الأولي قبل البدء بعملية المسح، ويتم بإحدى الطرق التالية:

– تعيين خط قاعدة مبدئي بواسطة الطريقة الساكنة قبل العمليات الحركية. وهي تستهلك وقتا طويلا ويمكن لهذا الغرض تطبيق الطرق الساكنة السريعة أيضا (*4.12.2*)

– قياسات قصيرة على قاعدة معروفة. يجب أن تكون مركبات شعاع تلك القاعدة معروفة بدقة ال *cm*. وهي سريعة التنفيذ وتحتاج إلى زمن قياس بحدود الدقيقة

– تستعمل عملية تبادل الهوائيات *anntena swapping* بكثرة لأنها سريعة، دقيقة ولاتحتاج إلى معرفة مسبقة لخط قاعدة (شكل *4.27*).



شكل *4.27*: المسح السريع بواسطة طريقة تبديل الهوائيات.

إحدى المحطات يجب أن تكون (من أجل المسح) معروفة، فيوضع اللاقط الآخر بجوارها على بعد أمتار ويتم رصد معطيات لفترة دقيقة واحدة تقريبا ثم يصار إلى تبديل الهوائيات (بالحفاظ على الإتصال بالأقمار المرصودة) ويقاس لفترة دقيقة أخرى تقريبا، ثم يتم البدء بالمسح المطلوب.

أغلب مصنعي الأجهزة يقدمون برامج لمعالجة المعطيات في الطريقة النصف حركية بإستعمال الطرق المذكورة هنا لحل الغموض البدائي.

4.12.4 الطرق الحركية البحتة *Pure Kinematic Methods*

يطلب أحيانا، لأغراض متعدد، معرفة إحداثيات هوائي لاقط *GPS* متحرك أثناء حركته في مساره وبخاصة في التطبيقات البحرية والجوية. في هذه الحالة لايمكن قبول فقدان الإتصال بالأقمار *loss of lock* بدون وجود إمكانية لتغطية قفزات القياسات وحل مشكلة الغموض. لذلك فهناك حاجة لطرق لتغطية قفزات قياسات الشيفرة والطور وكذلك لحل

الغموض أثناء حركة اللاقط. تعرف هذه الطرق بالحل بالسير أو بالطيران *Solution on the run, or on the fly*. فقط بإستخدام تلك الطرق يعتبر المسح الحركي بحت *pure kinematic*.

تستعمل إحدى الطرق الملائمة التالية لحل الغموض أثناء الحركة:

– تركيب قياسات الشيفرة والطور في اللواقط ذات ترددين وشيفرة دقيقة *P-code* (فقرة *4.9.3*)

– بإستخدام طريقة القياس المشتق بواسطة تركيب خطي *combination* للقياسات الرئيسية L_1, L_2 والذي يدعى المجال العريض جدا *extra wide lane* (فقرة *4.9.1*).

لحل الغموض في الطيران *on the fly* في الزمن اللحظي *real time* فإننا نحتاج لنقل المعطيات *data link* بأجهزة إتصال بسرعة *2000 bps*.

يصل مستوى الدقة في المسح الحركي البحت إلى ال *10 cm* ويمكن أن يصل إلى عدة سنتيمترات في حال توفر الظروف الجيدة الملائمة لذلك (تغطية أقمار، لواقط ذات تشويش منخفض، إنعدام تأثير تعدد طرق الإشارة *multipath*). في حالة التطبيقات التي لاتتطلب دقة عالية فلاحاجة لحل الغموض، ويتم عندها إستخدام الشيفرة كقيمة مقاسة.

4.13 الملاحة بواسطة ال *GPS Navigation with GPS*

تم تصميم نظام ال *GPS* أساسا كنظام ملاحي تحت التصرف في الزمن اللحظي *real time* وفي كافة أنحاء العالم. القياسات الممكنة هي:

1– قياسات مطلقة لأطوار الشيفرة

2– قياسات مطلقة لأطوار الموجة الحاملة والشيفرة

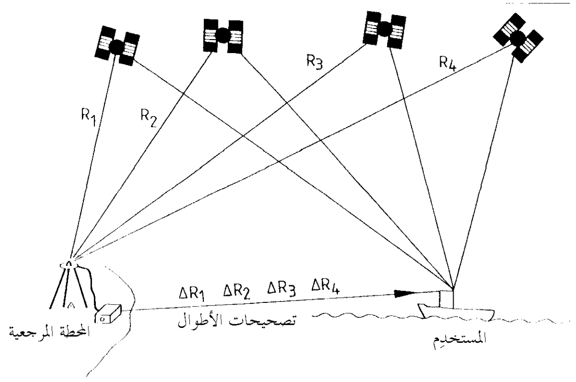
3– قياسات نسبية لأطوار الشيفرة

4– قياسات نسبية لأطوار الشيفرة المنقّحة (المفلترة) بإستخدام الموجة الحاملة *carrier smoothed*

5– قياسات نسبية لأطوار الموجة الحاملة (كقياس رئيسي) والشيفرة.

تعتبر الطريقة *1* هامة للأغراض الملاحية في الحالات التي لا تتطلب دقة عالية. معادلة الرصد الموافقة هي *4.27*. بوجود تأثير قابلية الإنتخاب *Selective Availability SA* فإن الدقة تنخفض إلى *±100 m*. وهذا لايكفي في أغلب تطبيقات الجيوديزيا البحرية *marine geodesy* والمساحة البحرية *hydrography*. ولذلك ليس من المفيد إستخدام الطريقة *2* في حال تعيين الموقع المطلق لأن تأثير *SA* يبقى. يمكن الإستفادة من قياسات الطور في هذه الحالة لتعيين السرعة. في التطبيقات الملاحية التي تحتاج إلى دقة عدة أمتار او عدة عشرات من الأمتار فإن دور القياسات النسبية هنا جوهري في كلا الطريقتين *3* و *4*. في كلا الحالتين تطلب قياسات متزامنة من محطة مركزية ثابتة *reference station* ذات إحداثيات معلومة.

تحسب فروقات الموضع المحسوب من القياسات في المحطة المرجعية من جهة وبين الموضع المعلوم من جهة أخرى، أو بين أشباه الأطوال المقاسة والمحسوبة من إحداثيات الأقمار والنقطة المرجعية وهذه الطريقة تستعمل بشكل أوسع. يتم إرسال (بث) الفروقات إلى اللاقط المتحرك *rover* على شكل تصحيحات لإحداثياته المحسوبة (أو لأشباه الأطوال المقاسة فيه). هذه الطريقة تدعى نظام التوضع العالمي التفاضلي *differential GPS DGPS* شكل (*4.28*).



شكل 4.28: GPS التفاضلي، تصحيحات أشباه الأطوال تبث إلى اللاقط المتحرك.

تعتمد الطرق الرياضية المطبقة في تعيين مواقع السفن غالبا على تركيب قياسات الطور والشيفرة (النموذج 4 المذكور). كقياسات الطور تتّخذ فروقات أشباه الأطوال المتعاقبة والتي لها دقة أعلى بكثير من دقة قياسات أشباه الأطوال بالشيفرة. الطريقة 5 تعطي أعلى دقة موافقة للطريقة الحركية البحتة.

4.14 الأخطاء والتصحيحات Error Budget and Corrections

4.14.1 إعتبارات أساسية Basic Considerations

تنشأ الأخطاء في عملية تقدير الوسائط من خلال التشكيل *Modelling* (الفرضيات المستعملة) المبسّط جدا وعدم إنطباقه مع الواقع الفيزيائي. المفهوم المبسط لقياس شبه الطول وللملاحة في الشكلين *4.2* و *4.18* لايلبيان بعض الشروط الفيزيائية بشكل كافي ومنها مثلا:

– جملة الإحداثيات المرجعية الجيومركزية المثبتة بالأرض *CTS* ليست نظام عطالي (كما هي معتبرة)

– ميكانيك نيوتن لم يطبق بشكل دقيق

–الإشارات لاتنتشر في الفراغ.

لذلك فإنه يجب تصحيح إحداثيات وساعات الأقمار الصناعية والقياسات بما يخص:

– دوران الأرض

– تأثيرات النسبية *relativistic effects* (في ساعة القمر)

– تأثيرات الإنتشار في طبقتي الإيونوسفير والتروبوسفير.

إضافة لذلك يمكن في حالة الضرورة إجراء تصحيحات بسبب عدم التشكيل *modelling* بشكل كامل لمسارات الأقمار، لتأخير إنتشار الإشارة *signal delay* داخل أجهزة القمر واللاقط *hardware* وتأثيرات ظاهرة تعدد طرق الإشارة *multipath*.

إن توزع الأخطاء يتأثر بالتوزع الهندسي للأقمار. يمكن إختصار كميات الأخطاء بإستعمال معادلات أدق وبقياسات إضافية.

يتم التعبير عن تاثير مصدر خطأ معين بتأثيره على المسافة المقاسة *range*. التأثيرات المتراكبة الناتجة عن عدم ثبوتية التقويمات، أخطاء الإنتشار، أخطاء الساعة والتوقيت، تشويش اللاقط، مسقطة على الخط الواصل بين القمر واللاقط، تدعى خطأ المجال المكافئ للمستخدم *User Equivalent Range Error UERE*. يظهر هذا الخطأ على شاشة أغلب اللواقط لكل قمر أثناء القياس ويعطي معلومات عن دقة القياسات المسجلة من القمر، وهذا يساعد في تقدير تأثير عملية *SA*.

تقسّم مصادر الأخطاء إلى ثلاث أقسام رئيسية:

- أخطاء موضع القمر
- أخطاء إنتشار الإشارة
- أخطاء اللاقط.

الجدول *4.8* يوضح قيم عددية وسطية لمصادر الأخطاء الفردية بشكل عام في نظام ال *GPS*.

	P-code		*C/A-code*	
المصدر	*SA off*	*SA on*	*SA off*	*SA on*
القمر				
مسار	*5 m*	*10-40 m*	*5 m*	*10-40 m*
ساعة	*1 m*	*10-50 m*	*1 m*	*10-50 m*
إنتشار الإشارة				
إيونوسفير (ترددين)	*cm-dm*	*cm-dm*	*cm-dm*	*cm-dm*
إيونوسفير (معادلة)	–	–	*2-100 m*	*2-100 m*
تروبوسفير (معادلة)	*dm*	*dm*	*dm*	*dm*
تأثيرات تعدد طرق الإشارة	*1 m*	*1 m*	*5 m*	*5 m*
اللاقط				
تشويش القياس *noise*	*0.1-1 m*	*0.1-1 m*	*1-10 m*	*1-10 m*
تأخيرات في عناصر البناء الداخلية *hardware*	*dm-m*	*dm-m*	*m*	*m*
مركز طور الهوائي *antenna phase center*	*mm-cm*	*mm-cm*	*mm-cm*	*mm-cm*

جدول *4.8*: التأثيرات الرئيسية لأخطاء نظام ال *GPS* على قياسات الطول.

دقة التعيين المطلق للشيفرة الدقيقة *P-code* في الزمن الحقيقي (الملاحة) هي *10-20 m* وفي التطبيقات الساكنة *3-5 m*، ودقة التعيين النسبي لكلا الشيفرتين *2-3 m*، ولأطوار الموجات الحاملة $0.5\ cm + 1.10^{-6}\ x\ (distance)$. تعتبر هذه الأرقام كتقريب عام. من أجل تأثير عملية قابلية الإنتخاب *Selective Availability SA* أنظر الفقرة *4.6*. يصرّح برنامج الملاحة الفيدرالي الأمريكي *Federal Radio Navigation Plan FRNP* عن مستويي الدقة التاليين: خدمة التوضع النظامي *Standard Positioning Service SPS* وخدمة التوضع الدقيق *Precise Postioning Service PPS*. الجدول *4.9* يبين مستويات الدقة تحت عمليتي ضد التشويش *Anti-Spoofing AS* وقابلية الإنتخاب *Selective Availability SA*.

		SPS		*PPS*	
SA	*AS*	*C/A-code*	*P-code*	*C/A-code*	*P-code*
Yes	*Yes*	*100*	*-*	*40*	*20*
No	*Yes*	*40*	*-*	*40*	*20*
Yes	*No*	*100*	*95*	*40*	*20*
No	*No*	*40*	*20*	*40*	*20*

جدول *4.9*: دقة التوضع في مجموعتي الخدمة *PPS* و *SPS*.

في حال توجب حساب إحداثيات الأقمار في إطار مرجعي أرضي (*earth-fixed*) في لحظة بث الإشارة من القمر فمن الضروري تصحيح دوران الأرض. أثناء إنتشار الإشارة من هوائي القمر بإتجاه هوائي اللاقط فإن جملة الإحداثيات المثبتة في الأرض *CTS* (فقرة *2.1.2*) تدور بالنسبة للقمر الصناعي، نتيجة لذلك يتغير موضع هوائي البث في جملة الإحداثيات الدوارة *CTS*. يجب إذا تدوير إحداثيات القمر الصناعي الأصلية حول المحور *Z* بزاوية α المعرّفة بجداء زمن إنتشار الإشارة τ مع سرعة دوران الأرض ω_e

$$\alpha = \omega_e . \tau \qquad 4.69$$

وتكون الزاوية α صغيرة لاتتجاوز ال *1.5* ثانية ستينية.

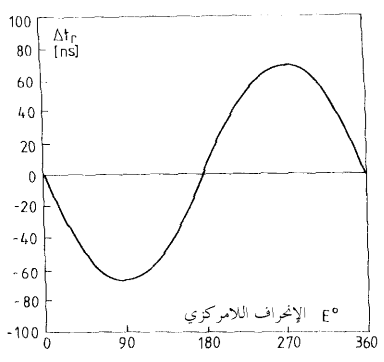
يجب أيضا إجراء التصحيح بخصوص تأثيرات النسبية *relativistic effects* لأن ساعة القمر والساعة الرئيسية التي يتم بموجبها تعيين زمن نظام ال *GPS* يتواجدان ويعملان في أمكنة ذات قوى جاذبية مختلفة ويتحركان بسرع مختلفة. يسبب تأثير النسبية هذا إنحرافا ظاهريا للتردد الأساسي المولّد في القمر من قبل مولّد الترددات *Oscillator*. يتم تعديل القسم الرئيسي لهذا التأثير بجعل تردد القمر الأساسي (*10.23 MHz*) أقل بمقدار *0.0045 Hz*. تبقى مركبة ثابتة صغيرة ناشئة عن إرتفاعات المدار المختلفة ومركبة زمنية *periodic*. يتم إدماج المركبة الصغيرة بوسيط إنحراف الساعة a_1 (فقرة *4.5.2*). ويجب أيضا تصحيح قراءة ساعة القمر بسبب المركبة الزمنية المذكورة

$$\Delta t_r[s] = -4.443 \cdot 10^{-10} e\sqrt{A}[m] \sin E \tag{4.70}$$

وتغيّرها مع الزمن

$$\dot{\Delta} t_r[s] = -4.443 \cdot 10^{-10} \sqrt{A}[m] \cos E \frac{dE}{dt}. \tag{4.71}$$

الشكل *4.29* يبين تأثير التصحيح في المعادلة *4.70* من أجل دورة كاملة للقمر الصناعي. يمكن أن يبلغ مقدار التصحيح حتى *70 ns* (نانو ثانية) في الزمن وحتى *0.01 ns/sec* من أجل التغيّر.



شكل *4.29*: تصحيحات النسبية من أجل دورة قمر كاملة.

يمكن تخفيف تأثيرات أخطاء النسبية *relativistic errors* المتبقية بواسطة القياسات النسبية *relativ observations*.

4.14.2 توزع الأقمار الهندسي وقياس الدقة *Satellite Geometry and Accuracy Measures*

تتعلق دقة التوضع في نظام ال *GPS* بعاملين:

– دقة قياس شبه الطول، معبّر عنها ب *UERE* (*4.14.1*) أو بالإنحراف المعياري له σ_r

– التوزع الهندسي للأقمار المستخدمة.

العلاقة بين σ_r والإنحراف المعياري للتوضع المتعلق به σ^* يتم وصفها بكمية عددية مستعملة بالملاحة وتدعى تبعثر الدقة *Dilution of Precision DOP*

$$\sigma^* = DOP \ \sigma_r \tag{4.72}$$

تستعمل عدة كميات لتبعثر الدقة

من أجل التوضع الأفقي $\sigma_H = HDOP \ \sigma_r$

من أجل التوضع الشاقولي $\sigma_V = VDOP \ \sigma_r$

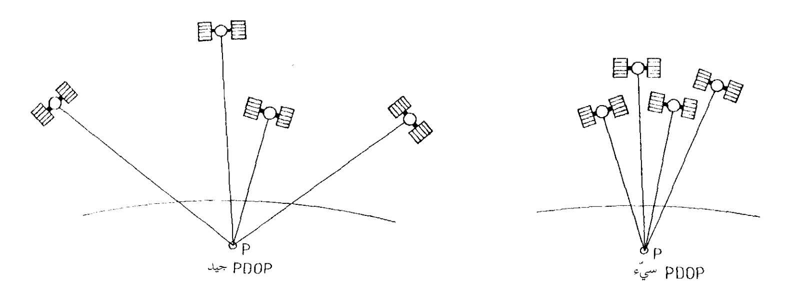
من أجل التوضع ثلاثي الأبعاد $\sigma_P = PDOP \ \sigma_r$

من أجل تعيين الزمن $\sigma_T = TDOP \ \sigma_r$

التأثير المركّب من الموضع والزمن يدعى تبعثر الدقة الهندسي

$$GDOP = \sqrt{(PDOP)^2 + (TDOP)^2} \tag{4.73}$$

يمكن تفسير القيمة *PDOP* بأنها تساوي قيمة مقلوب حجم شكل السطوح المثلثية *tetrahedron* المتشكل من مواضع الأقمار واللاقط *PDOP=1/V*. الشكل *4.30* يوضح أن أفضل وضعية هي عندما يكون هذا الحجم أعظمي وبالتالي تكون قيمة عامل تبعثر الدقة *PDOP* أصغرية.



شكل *4.30*: التوزع الهندسي للأقمار وعامل تبعثر الدقة.

نفس النتيجة يمكن إستنتاجها من قوانين التعديل وإنتشار الأخطاء.

بإعتبار أن توزع الأقمار الهندسي بالنسبة للراصد يختلف من موقع لآخر على الأرض، وبالتالي قيمة *DOP* فإنه يتم إختيار وتحديد زمن الرصد المرغوب *observation window* إعتمادا على قيمة جيدة (صغيرة) ل *DOP* حيث تتوفر فيه شروط هندسية ملائمة للقياسات.

إن معرفة قيمة *DOP* هامة في الملاحة حيث يختار اللاقط، بشكل آلي، الأقمار الأربعة التي تعطي أقل قيمة وبالتالي أفضل توزع هندسي للأقمار بالنسبة للاقط. في التطبيقات المساحية تقتصر أهمية معرفة ال *DOP* على التخطيط المسبق للعمل ولطرق المسح الحركي والسريع الساكن *rapid static*.

قياس الدقة المستعمل عادة بالمساحة والجيوديزيا هو الإنحراف المعياري σ ويدعى أيضا جذر الخطأ المتوسط التربيع *root mean square error RMS*. إحتمال توضع نقطة في منطقة معينة يوصف بقطع ناقص الثقة *Confidence Ellipse* (من أجل التعيين ثنائي الأبعاد) و بإهليلج الثقة *Confidence Ellipsoid* (من أجل التعيين ثلاثي الأبعاد)، بإحتمال موقع النقطة في المركز. تكون محاور القطع الناقص تابعة للإنحراف المعياري للإحداثيات ولدرجة الإحتمال. درجات الإحتمالات الدارجة الإستعمال هي *68.3%* من أجل 1σ، *95.5%* من أجل 2σ و *99.7%* من أجل 3σ. معلومات إضافية موجودة في مراجع مختصة بالتعديل والإحصاء.

تختلف عادة مقاييس الدقة في الملاحة عنها في الجيوديزيا والمساحة. تعتمد غالبا على دقة مايسمى خطوط الموقع *Line Of Position LOP* (الملاحة المستوية) أو سطوح الموقع (في الملاحة ثلاثية الأبعاد). كل نظام ملاحي يعرّف خطوط الموقع *LOP's* الخاصة به. إن موقع المستعمل هو إذن تقاطع إثنين أو أكثر من خطوط أو سطوح الموقع. ندرج فيما يلي بعض المعلومات العامة دون الدخول بالتفاصيل.

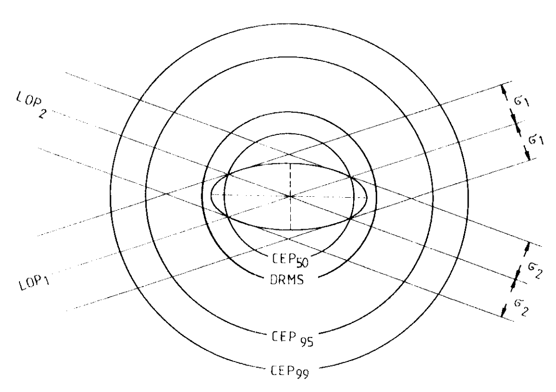
يعبّر بشكل عام عن الدقة (ثنائية الأبعاد) بجذر متوسط التربيع للمسافة *Distance Root Mean Square DRMS*

$$DRMS = \sqrt{\sigma^2{}_\varphi + \sigma^2{}_\lambda} \quad 4.74$$

إحتمال الوقوع ضمن دائرة ذات نصف قطر قدرة *DRMS* يتراوح بين *63.2%* و *68.3%*. يستعمل التعبير التالي بشكل متكرر (مثلا في منشورات برنامج الملاحة الفيدرالي الأمريكي *Federal Radio Navigation Plan FRNP*):

$$2\ DRMS = 2\ x\ DRMS = 2\sqrt{\sigma^2{}_\varphi + \sigma^2{}_\lambda} \quad 4.75$$

يبلغ هنا الإحتمال *95.4%-98.2%*. يجب هنا الإنتباه لعدم الإلتباس بين *2 DRMS* وبين *2D-RMS* (جذر الخطأ المتوسط التربيع *root mean square error RMS* الثنائي الأبعاد) والذي يوافق هنا في الملاحة العامل *DRMS* (شكل *4.31*).



شكل 4.31: مقاييس الدقة الجيوديزية والملاحية المستخدمة في النشرات الدراسية الإختصاصية.

يستعمل أيضا تعبير يدعى الخطأ الدائري المحتمل *Circular Error Probable CEP* بدرجات إحتمالات مختلفة، فمن أجل درجة إحتمال *50%* لدينا

$$CEP=0.59\ (\sigma_\varphi+\sigma_\lambda) \quad 4.76$$

وهناك مقاييس أخرى مثل:

$CEP_{95}=CEP \times 2.08$ من أجل درجة إحتمال قدرها *95%*

$CEP_{99}=CEP \times 2.58$ من أجل درجة إحتمال قدرها *99%*.

مقاييس الدقة ثلاثية الأبعاد هي الخطأ الكروي الشعاعي المتوسط *Mean Radial Spherical Error MRSE*

$$MRSE=\sqrt{\sigma^2{}_\varphi+\sigma^2{}_\lambda+\sigma^2{}_h} \quad 4.77$$

بدرجة إحتمال *61%*، والخطأ الكروي المحتمل *Spherical Probable Error SEP* والذي يساوي

$$SEP=0.51\cdot\left(\sigma_\varphi+\sigma_\lambda+\sigma_h\right) \quad 4.78$$

بدرجة إحتمال *50%*.

من الواضح هنا أنه للدلالة على الدقة يجب إظهار القياس المعني. فمثلا في حال الدقات المتوفرة في كل من *SPS* و *PPS* لدينا

– خدمة التوضع المعياري *SPS* بوجود *SA*:

2DRMS (95%)	(λ, φ)	100 m
CEP (50%)	(λ, φ)	40 m
SEP (50%)	(λ, φ, h)	76 m

من الجدير ملاحظته أن أرقام الدقة الثلاث المعطية تصف وضعية واحدة

– خدمة التوضع الدقيق *PPS* (يمكن حذف تأثير ظاهرتي *SA* و *AS*)

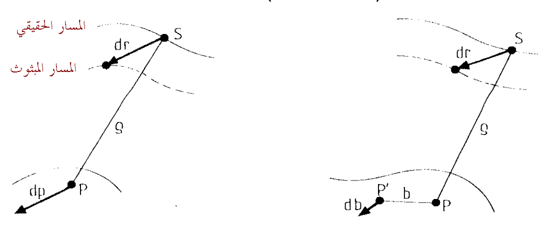
SEP (50%)	30 m	C/A-code
SEP (50%)	16 m	P-code (Y-code)

4.14.3 المدارات والساعات *Orbits and Clocks*

إن الفروقات بين التقويمات المتنبأ عنها و بين حالة المدارات الحقيقية تنتقل إلى (تترسب في) مواقع هوائيات المستعمل. من المؤكد أن المركبة القطرية لخطأ المدار تفسد عملية تعيين شبه الطول، وبالتالي موقع المستعمل، بصورة أكبر في حالة التعيين المطلق منها في حالة التعيين النسبي. من أجل محطات الرصد القريبة، فإن أغلب أخطاء المدار يتم حذفها أثناء عملية التفاضل (طرح القياسات) وتعيين الإحداثيات النسبية. كقاعدة تقريبية عامة يوثر خطأ مدار *dr* على قاعدة طولها *b* بالشكل التالي:

$$\frac{db}{b}=\frac{dr}{\rho}، \quad 4.79$$

حيث ρ بعد القمر الصناعي عن محطة القياس (شكل *4.32*)



شكل *4.32*: تأثير خطأ المدار على التعيين المطلق (يسار) والتعيين النسبي (يمين).

إن أكبر مسافة بين قمر صناعي وراصد تبلغ حوالي *25000 km*. في حال قبول خطأ مقداره *1 cm* في تعيين قاعدة، فإن الجدول *4.10* يبين أخطاء المدار المقبولة بالنسبة لأطوال القواعد المختلفة.

خطأ المدار المقبول	طول القاعدة
2500 m	*0.1 km*
250 m	*1.0 km*
25 m	*10 km*
2.5 m	*100 km*
0.25 m	*1000 km*

جدول *4.10*: العلاقة بين أخطاء المدار وخطأ قاعدة مقداره *1 cm*.

من الملاحظ أن خطأ المدار لايلعب دورا حرجا في التعيين النسبي لقواعد قصيرة، إنما للحصول على دقة *1 cm* في القواعد الطويلة جدا (في التطبيقات الجيوديناميكية) فإن التوصل لدقة *1 m* لمدار القمر سيكون صعب التحقيق. في أغلب الحالات تعطى دقة تعيين القواعد بشكل نسبي كما هو مبين في الجدول *4.11*.

خطأ المدار المقبول	الدقة النسبية المطلوبة
125 m	*5 ppm*
25 m	*1 ppm*
12.5 m	*0.5 ppm*
2.5 m	*0.1 ppm*

جدول *4.11*: الدقة النسبية وأخطاء المدار.

إن المعادلة *4.79* تقريبية وتعتبر متفائلة جدا ويجب أن تستعمل فقط للتقريب العام.

بإعتبار أن إرتفاع الأقمار عن الأرض كبير فإن المدارات لاتتأثر كثيرا بالقوى السطحية وعوامل حقل الجاذبية ذات المرتبة العالية. من أجل حساب أقواس المدار القصيرة يكفي نشر معادلة حقل الجاذبية لغاية المرتبة والدرجة *4,4* أو *6,6*. يجب إضافة تأثيرات قوى جاذبية الشمس والقمر وضغط الشعاع الشمسي في معادلة المدار. والعناية بشكل خاص بحساب القوى الغير ناتجة عن الجاذبية (فقرة *3.2*).

تبلغ دقة المدارات المبثوثة ضمن التقويمات *15-25 m*. وحسب الجدول *4.10* تكفي هذه الدقة للعمل في شبكات ذات إتساع *10 km*. يمكن أن تنخفض دقة المدارات بتأثير عملية الإنتخاب *SA*. في حال توجب الحصول على دقة عالية على مسافات واسعة تطبق عند ذلك طرق حسابية لتحسين دقة المدارات. إحدى الإمكانيات هي الحصول على تقويمات دقيقة *precise ephemerides* معتمدة على قياسات محطات رصد موزعة في العالم، تعمل فيها لواقط ثنائية التردد، وتقاس الشيفرات وأطوار الموجات الحاملة لكل الأقمار المرصودة. وتستخدم مولّدات تردد (ساعات) عالية الدقة (روبيديوم، مولدات التردد الذرية *atomic cesium standards*) وذلك لفصل أخطاء المدار عن أخطاء الساعات. تعيّن التقويمات الدقيقة *precise ephemerides* من قبل وكالة الخرائط التابعة لقسم الدفاع الأمريكي *U.S. Defence Mapping Agency* معتمدة على قياسات من *10* محطات موزعة في العالم (وهن خمسة محطات مراقبة *Operational Control Stations* *OCS* تابعة للقسم الفضائي للنظام *GPS* وخمسة محطات تابعة لوكالة الخرائط الأمريكية المذكورة متوضعة في أمريكا، إنكلترة، البحرين وأستراليا). تنقّح أشباه الأطوال المشتقة من القياسات المذكورة والمسجلة كل *1.5* ثانية. تكون القياسات

دقيقة ذات تشويش *10-20 cm*. تتألف التقويمات الدقيقة من إحداثيات وسرعة مركز كتلة كل قمر صناعي، وذلك في جملة الإحداثيات المثبتة بالأرض بنظام ال *WGS84* المرجعي المعتمد. طريقة الحساب مطابقة لمعايير الخدمة الدولية لدوران الأرض *International Earth Rotation Service IERS*. تقدّر أخطاء المدار في التقويمات الدقيقة بحدود *1-3 m*.
تقوم مجموعات وهيئات الأبحاث الدولية ذات الصفة المدنية بتشغيل شبكات عالمية دقيقة لخدمة الأغراض العلمية (حساب المدارات الدقيقة، وسائط دوران الأرض، دراسات الثقالة وغيرها). تم مثلا تأسيس الخدمة الدولية للجيوديناميك بواسطة ال *International GPS Geodynamics Service IGS GPS* في عام *1991*. بدأت هذة الهيئة العلمية باستخدام حوالي *30* محطة رصد موزعة في العالم، وتشترك حاليا عشرات من المحطات الإضافية في حملات القياسات الدولية المتزامنة. تؤمن *IGS* وسائط دقيقة لدوران الأرض، ومدارات أقمار دقيقة (في حملة قياساتها الدولية الأولى عام *1992* حصلت على دقة مدار *1-2 m*)، ومعطيات مرجعية دقيقة لنقاط إستناد معروفة *fiducial points*.
من أجل حملات القياس المحلية يكفي تحسين مسارات الأقمار من خلال عملية التعديل، وذلك بحساب عناصر (*1-6*) من عناصر مدار كيبلر (فقرة *3.1.1*). يمكن زيادة تحسين النتائج في حال توافر نقاط دقيقة معروفة الإحداثيات *fiducial points* (وهي متوفرة في العالم وقد تم تعيينها مسبقا بعمليات قياس المسافات بالليزر *SLR* أو بطرق التداخل على مسافات بعيدة *VLBI*). تم تطوير طرق حديثة للحصول على مدارات عالية الدقة وذلك إنطلاقا من مفهوم نقاط الإستناد *fiducial points*، وقد طبّقت بشكل خاص في مجال الجيوديناميك. يتوقّع، وبفرصة كبيرة، التوصل لدقة مدار أقل من متر *sub-meter* وبالتالي لدقة نسبية بحدود $1x10^{-8}$ في قياس القواعدة على الأرض، وهذا يعني *1 cm* على قاعدة طولها *1000 km*.

إن مدارات غير دقيقة للأقمار تؤدي لحدوث أخطاء في التعيين المطلق *absolut positioning* تبلغ عشرات الأمتار، وهذا يؤثر على التعيين النسبي. في التعيين النسبي يجب إذا الإنطلاق من محطة مركزية دقيقة الإحداثيات.
تسبّق ساعات القمر بمقدار *38.5* ميكروثانية باليوم. هذا التصحيح يمتص أكثر من *99.6%* من تأثير النسبية *relativistic effect* على الساعة. في حال الضرورة تقوم محطة التحكم الرئيسية بتطبيق تصحيحات إضافية لتزامن ساعات القمر مع زمن النظام *GPS Time* بدقة *±1 ms* بالزمن وبدقة $\pm 1x10^{-9}$ بالتردد.
من أجل الملاحة اللحظية *real time* يجب أن تكون ساعات القمر ثابتة التردد ومتطابقة مع زمن النظام، لذلك يستعمل في القمر مولّدات تردد *oscillators* من الروبيديوم والسيزيوم، بينما يكفي لمولدات التردد في اللاقط أن تكون ثابتة للتمكن من قياس أشباه الأطوال بواسطة الشيفرة (طور الشيفرة). لذلك يكفي أن تكون ساعة اللاقط من الكوارتز. في أغلب التعديلات الجيوديزية يتم حذف أخطاء ساعة اللاقط بعملية تفاضل *differencing* قياسات طور الموجة.
تمثّل حالة ساعة القمر بكثير حدود من الدرجة الثانية (فقرة *4.5.3*) تعيّن ثوابته في قسم التحكم. تختلف الحالة اللحظية للساعة رغم ذلك عن كثير الحدود المبثوث، لذلك يمكن، في حال التطبيقات عالية الدقة، حساب مجاهيل لساعة القمر أثناء عملية التعديل. وهذا أيضا ضروري في حال إشتراك لواقط مختلفة النماذج (قياسات بأزمنة غير متطابقة) في فترة قياسات واحدة.

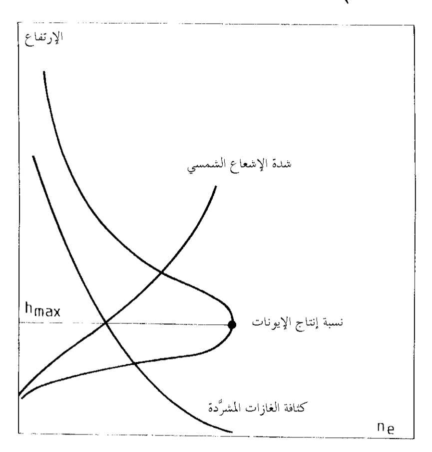
4.14.4 إنتشار الإشارة *Signal Propagation*

تعاني إشارة ال *GPS* أثناء إنتشارها من هوائي القمر الصناعي إلى هوائي اللاقط من تأثيرات الإنتشار التالية:
- تأخير الإنتشار *Propagation delay* في طبقة الإيونوسفير
- تأخير الإنتشار في طبقة التروبوسفير *troposphere*
- إنتشار متعدد الطرق *multipath* عند القمر وفي جوار هوائي اللاقط.

4.14.4.1 تأثير طبقة الإيونوسفير على إشارات نظام GPS *Ionospheric Effects on GPS Signals*

الإيونوسفير هي تلك الطبقة العليا من الغلاف الجوي التي تكون فيها نسبة الإلكترونات والإيونات كافية للتأثير على إنتشار الموجات الإلكترومغناطيسية، يبلغ إرتفاعها *50-2000 km* عن سطح الأرض. يتعلق إذا تأخير إنتشار الإشارة *propagation delay* في طبقة الإيونوسفير بكمية الإلكترونات والإيونات الموجودة على طول مسار الإشارة وعلى التردد المستعمل. العوامل الرئيسية المؤثرة هي النشاط الشمسي *solar activity* والحقل المغناطيسي *magnetic field*، يدعى الخطأ الناتج عن إنتشار الإشارة في طبقة الإيونوسفير بالإنكسار الإيونوسفيري *ionospheric refraction* ويتعلق بالتردد المستعمل، الموقع الجغرافي والزمن. خطأ المسافة (في شبه الطول) الناتج يتراوح بين *1-100 m*. تستفيد اللواقط ثنائية التردد من تأثير الإيونوسفير المختلف على كل تردد. وكما رأينا أن الإيونوسفير هو وسط مبعثر *dispersive medium* (فقرة *2.3.2*)، مما يعني أن سرعة إنتشار الطور *phase velocity* (الموجة الحاملة) تختلف عن سرعة إنتشار الحزمة *group velocity* (إنتشار الشيفرة). يجدر ذكره أننا هنا نعني بالتأخير الإيونوسفيري هو التأخير المسبب من قبل كلا طبقتي الإيونوسفير والبلاسماسفير *Plasmasphere* (واللتان تحويان إلكترونات حرة).

تستند أغلب معادلات تشكيل التأثير الإيونوسفيري على فرضيات تقريبية للتمكن من تطبيق علاقات رياضية مناسبة. تعتبر فرضية الطبقة الوحيدة *single layer model* من أهم تلك النظريات والتي يتم إستخدامها لحل القسم النظامي من التأثير الإيونوسفيري. وتنص على إعتبار أن كل الإلكترونات المتواجدة في طبقات الإيونوسفير تكون مركزة في طبقة رقيقة جدا على إرتفاع h_I من سطح الأرض (شكل *4.34*). يقدر الإرتفاع h_I بحيث يقع في مركز توزع الإلكترونات، وهو يقع في الإرتفاع *300-400 km* (شكل *4.33*).



شكل *4.33*: تغير نسبة الإلكترونات بالإرتفاع عن سطح الأرض.

لدينا قرينة الإنكسار *refraction coefficent* من أجل قياسات طور الموجة الحاملة:

$$n_p = 1 - 40.3\frac{n_e}{f^2} \qquad 4.80$$

حيث n_e محتوى الإلكترونات على طول طريق الإشارة، و f تردد الموجة الحاملة.

إن تأثير الإيونوسفير على سرعة الزمرة (إنتشار الشيفرة) هو في التقريب الأول نفسه ولكن بإشارة معكوسة:

$$n_g = 1 + 40.3\frac{n_e}{f^2} \cdot \qquad 4.81$$

التكامل على طول طريق الإشارة s يعطي التأثير الكلي للإنكسار الإيونوسفيري على قياسات شبه الطول بواسطة طور الشيفرة

$$\delta R_{ION} = \int_s (n_g - 1)ds$$
4.82

$$\delta R_{ION} \approx \frac{40.3}{f^2} \int_s n_e ds.$$
4.83

ومن أجل قياسات الطور تكون

$$\delta R_{ION} \approx -\frac{40.3}{f^2} \int_s n_e ds.$$
4.84

لذلك تقاس مسافة أطول من المسافة الحقيقة في حال القياس بواسطة الشيفرة، بينما تقاس مسافة أقصر في حال القياس بواسطة طور الموجة.

يمكن تعيين التكامل المجهول بواسطة قياسات الأطوال R بواسطة كلا الموجتين L_1, L_2.

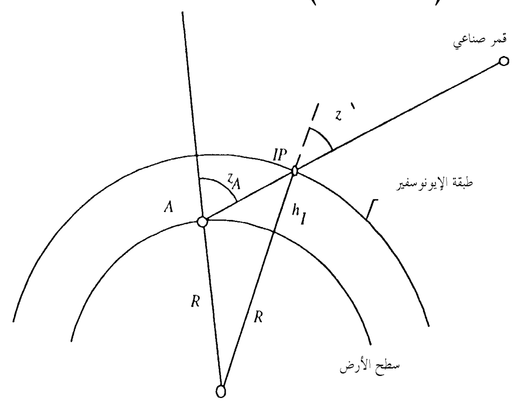
$$R = R_1 - \delta R_{1,ION}$$
$$R = R_2 - \delta R_{2,ION}.$$
4.85

بالتعويض نجد تصحيح المسافة *range correction* لقياسات طور الشيفرة للتردد الأول L_1 مشتقا من قياسات الترددين

$$\delta R_{1,ION} = \frac{R_1 - R_2}{1 - (\frac{f_1^2}{f_2^2})}.$$
4.86

بسبب التقريبات والفرضيات المعتبرة في إشتقاق المعادلة *4.80*، تسمى المعادلة *4.86* تصحيح الإنكسار الإيونوسفيري من المرتبة الأولى *first order*.

الجدول *4.12* يبين الأخطاء الأعظمية للمسافة المقاسة بالمتر لإشارات ذات إتجاة عمودي (القمر في نقطة السمت *zenith*). تزداد هذه القيم من أجل إشارات مائلة (الشكل *4.34*).



شكل *4.34*: معادلة الطبقة الوحيدة *single layer model*.

حيث A موقع اللاقط، R نصف قطر الأرض، IP نقطة واقعة على الطبقة الإيونوسفيرية المفروضة ذات الإرتفاع h_I.

التردد	تأثير حد الدرجة الأولى ($1/f^2$)	تأثير حد الدرجة الثانية ($1/f^3$)	تأثير حد الدرجة الثالثة ($1/f^4$)
L1	32,5	0,036	0,002
L2	53,5	0,076	0,007
L1/L2	0,0	0,026	0,006

جدول *4.12*: أخطاء المسافات العمودية الأعظمية الناتجة عن تأثير الإيونوسفير.

من الملاحظ أنه يمكن التغلب على تأثير الإيونوسفير بشكل كبير (حذفه أو حساب قيمته) بواسطة قياسات ترددين. يمكن أيضا إشتقاق معادلات بهذا الخصوص من أجل قياسات طور الموجة

$$\delta\Phi_{ION}(L1) = \frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2}\left(\Phi(L1) - N(L1) - \frac{f_1}{f_2}(\Phi(L2) - N(L2))\right)$$
4.87

حيث $N(L_1)$ و $N(L_2)$ حدود الغموض لكل من الترددين. المعادلة *4.87* تمثل تسبيق الطور بسبب الإيونوسفير من أجل التردد الأول L_1.

بتركيب قياسات L_1 و L_2 نحصل على التركيب المحرّر من الإيونوسفير *ionospheric free linear combination*

$$\Phi(L_0) = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}\Phi(L1) - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}\Phi(L2)$$

7.88

وتدعى أيضا L_3 (علاقة *4.48a*).

في حال إستعمال لواقط ذات تردد واحد فيمكن تصحيح الإيونوسفير وفق المعادلتين *4.86* و *4.87*. إحدى الطرق هي إستخدام معادلة تصحيحية، تدعى معادلة كلوبوخار *Klobouchar model*، يتم بث عواملها الثمانية (α_i, β_i) ضمن الخبر الملاحي الملتقط من اللاقط إلى جانب القياسات. تحذف هذه المعادلة *50%* تقريبا من تأثير الإيونوسفير وذلك في المناطق ذات زوايا العرض الجغرافية المتوسطة.

$$\begin{aligned} \Delta T_{ION} &= DC + A\cos(2\pi(t-\Phi)/P) \quad [\text{day}] \\ \Delta T_{ION} &= DC \quad [\text{night}] \end{aligned}$$

4.89

حيث:

ΔT_{ION} التأخير الإيونوسفيري الشاقولي (من اجل إشارة تسقط عموديا على محطة الرصد) مقدرا ب *ns* نانوثانية.

DC إنحراف *offset* ثابت بين الليل والنهار (*5 ns*)

A المطال *amplitude*

Φ إنحراف *offset* الطور الثابت (الساعة 14^{00} بعد الظهر)

t الزمن المحلي

P الدورة *Period*، وأيضا لدينا

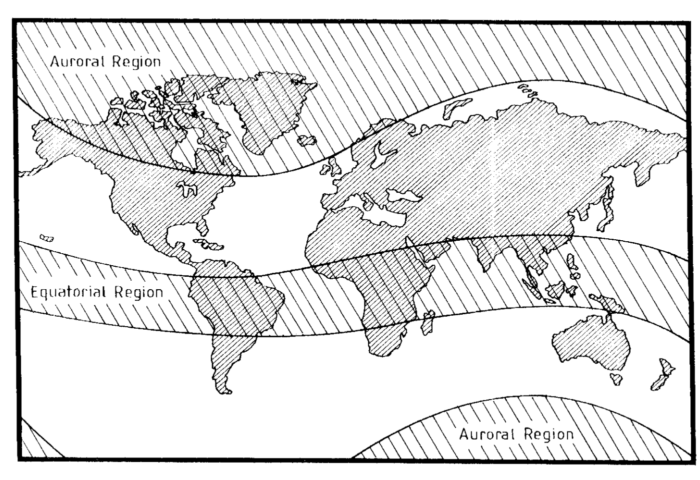
$$A = \sum_{n=0}^{3} \alpha_n \Phi^n (\text{seconds}); \quad P = \sum_{n=0}^{3} \beta_n \Phi^n (\text{seconds}).$$

4.90

طريقة أخرى ممكنة للتصحيح الإيونوسفيري (في حال إستعمال لاقط واحد) وذلك بإستخدام لاقط ذو ترددين متوضع في مركز منطقة العمل وحساب التصحيح بواسطته للّواقط الأخرى وحيدة التردد. وتعمل هذه الطريقة بنجاح في حال توفر شروط ملائمة (شروط إيونوسفيرية متجانسة وهادئة) وهي غير مفيدة في المناطق أو الأمكنة التي تكون فيها طبقة الإيونوسفير مشوشة وكمية الإلكترونات كبيرة.

تحذف الأخطاء المتبقية في حساب الإيونوسفير، في أغلب الأحيان، خلال عملية القياسات النسبية بين محطتين متجاورتين على مسافة قريبة، وذلك لأن القمر يرصد تحت نفس الظروف الجوية في المحطتين. الأخطاء المتبقية في لاقط وحيد التردد تبلغ *1-2 ppm* من المسافة بين اللواقط، وهذا يعني *1-2 cm* على مسافة *10 km*. هذه التقريبات صالحة فقط من أجل طبقة إيونوسفيرهادئة ومناطق ذات زوايا عرض جغرافية متوسطة. في الحالات الأخرى تكون القيم أعلى بكثير، لذلك ينصح دوما في التطبيقات الدقيقة بإستخدام لواقط ذات ترددين.

يمكن لتغيرات مفاجئة غير منتظمة *irregularities* في طبقة الإيونوسفير أن تسبب تغيّرات قصيرة الأمد في مطال *amplitude* وطور الإشارة. تدعى هذه بتأثيرات الومضان *scinttilation effects* وتحدث بشكل رئيسي في الحزام الجغرافي *±30* درجة شمال وجنوب خط الإستواء الجيومغناطيسي *geomagnetic equator*، وفي مناطق الشفق القطبية *auroral polar zones*. محتوى الإلكترونات العالي يحدث فقط في الأماكن الإستوائية (شكل *4.35*).



شكل *4.35*: مناطق النشاط الشمسي المرتفع.

تحدث ظواهر الومضان في المناطق الإستوائية بشكل أعظمي إعتبارا من مرور ساعة بعد الغروب ولغاية منتصف الليل تقريبا، لذلك ينصح بعدم القياس بهذا الوقت في حال كون الدقة المطلوبة من القياسات عالية. يمكن أن يسبّب تأثير الومضان عدد ضخم من قفزات القياسات *cycle slips*. من ناحية أخرى فإن عدد الإلكترونات المرتفع جدا يخرب عملية حل الغموض حتى على مسافات قصيرة. في هذه الحالة فإن أفضل طريقة للحل هي إستعمال تركيب مختلط بين الشيفرة والطور بإستخدام معطيات لواقط ذات شيفرة دقيقة *P-code/Y-code*.

في تعيين مسافات بلواقط ذات تردد واحد على مسافات *10 km* تم تمييز أخطاء نسبية حتى *30 ppm* في البرازيل.

يعاني النشاط الشمسي *solar activity* من صعود وهبوط بفترات دورية متساوية تقريبا تبلغ *11* سنة. يتوقع أن يعاني النشاط الشمسي من ركوده القادم في عام *1997*.

4.14.4.2 تأثير طبقة التروبوسفير على إشارات نظام ال *GPS Tropospheric Effects on GPS Signals*

تتأثر كل الموجات الإلكترومغناطيسية لغاية المجال *15 GHz* بنفس الطريقة لأن التروبوسفير ليست وسطا مبعثرا (فقرة *2.3.2*). يمكن وصف الإنعكاسية N كتابع للعوامل الجوية بواسطة معادلات تجريبية. نتخذ مثلا معادلة هوبفيلد *Hopfield* التجريبية والمستخدمة بشكل واسع. يكتب التأثير الكلي للمسافة المقاسة (من اللاقط إلى القمر):

$$\Delta s_T = \frac{K_d}{\sin(E^2+6.25)^{\frac{1}{2}}} + \frac{K_w}{\sin(E^2+2.25)^{\frac{1}{2}}} \qquad 4.91$$

حيث K_d و K_w تمثلان التأثير الكلي (الجاف والرطب) للإنكسار التروبوسفيري في الإتجاه العمودي *zenith*، E زاوية إرتفاع القمر عن الأفق في محطة الرصد (بالدرجة). ولدينا

$$K_d = 155.2 \cdot 10^{-7}\frac{P}{T}H_d$$
$$K_w = 155.2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{4810e}{T^2}H_w. \qquad 4.92$$

في العلاقة *4.92* تعني الوسائط:

P الضغط الجوي بالهيكتوباسكال (*Hpa*)، حيث *1* باسكال (*Newton/m²*) تساوي $7.5x10^{-6}$ متر زئبق،

e الضغط الجزئي لبخار الماء (*Hpa*)،

T درجة الحرارة بمقياس كالفن (*Kelvin*).

تعطى قيمة H_d التجريبية بالعلاقة

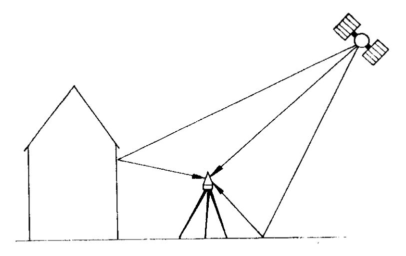
$$H_d = 40.136 + 148.72(T - 273.16) \qquad 4.93$$

و H_w بقيمة وسطية حوالي *11.000 m*.

يعتبر التأخير التروبوسفيري حرجا في التعيين الدقيق لخطوط القواعد *baseline* وخاصة في مركّبة الإرتفاع. وبإعتبار أن تأثير التروبوسفير مستقل عن التردد (فقرة *2.3.2*) فلا يمكن حسابه من قياسات ترددين مختلفين. تبلغ Δs_T وسطيا قيمة *2.3 m* وتزداد من أجل زوايا إرتفاع صغيرة، ويصل حتى *20 m* من أجل $E=10°$. في حال كون محطات الرصد قريبة من بعضها البعض فإن تأثير التروبوسفير يحذف أثناء عملية تفاضل القياسات (فقرة *4.9.1*) في حالة القياسات النسبية، لذلك لا ينصح بإدخال قياسات الأحوال الجوية *atmospheric paramters* في تعديل الشبكات الصغيرة في المناطق الغير جبلية. يستعمل عوضا عن ذلك عوامل جوية نظامية متطابقة لكل المحطات. في حال الشبكات الكبيرة (مثلا *50 km*<)، أو في حال فروق إرتفاعات أكبر (مناطق جبلية) فإن العوامل الجوية ليست مرتبطة مع بعضها البعض. هنا يكون إدخال العوامل الجوية صعبا، حيث يعتبر التأخير الناتج عن المركبة الرّطبة (علاقة *4.92*) من أعقد مصادر الأخطاء في ال *GPS*. إحدى طرق تعيين محتوى بخار الماء في الهواء على مدى إنتشار الإشارة هو قياسها المباشر بواسطة راديومتر بخار الماء *water vapor radiometer*. تكون تلك الأجهزة معيّرة ومرتفعة التكلفة، وتستعمل في مشاريع البحث العلمي أو المشاريع الكبرى.

4.14.4.3 تعدد طرق الإشارة *Multipath*

إنتشار متعدد الطرق يعني أن إشارة أو عدة إشارات منعكسة تصل هوائي اللاقط إضافة إلى إشارة القمر المباشرة. يمكن أن يحدث الإنعكاس على سطوح أفقية، شاقولية أو مائلة (شكل *4.36*). الأبنية السكنية، شوارع، معابر مائية وعربات تشكل أمثلة على تلك السطوح. لذلك يجب أخذ هذا بعين الإعتبار أثناء إختيار مواقع اللواقط.



شكل *4.36*: تعدد طرق الإشارة *Multipath*.

يؤثر تعدد طرق الإشارة *Multipath* على كل من قياسات طور الموجة الحاملة والشيفرة. إن تأثيره على قياسات الشيفرة أكبر بمرتبتين من تأثيره على قياسات طور الموجة الحاملة. تم رصد تغيرات هذا التأثير على قياسات الشيفرة الدقيقة للّاقط *TI4100*، وقد تراوحت قيمها بين *1.3 m* و *4-5 m* في بيئات قياس مختلفة. يؤدي هذا التأثير في ظروف قياس سيئة لفقدان الإتصال مع القمر، ويسبب قفزات قياسات *cycle slipe* عديدة (*4.10.1*). يجب العناية بحساب تأثير تعدد طرق الإشارة خاصة بازدياد إستعمال لواقط الشيفرة الدقيقة *P-code* في المسح الدقيق والمسح السريع.

يسبب تأثير تعدد طرق الإشارة على قياسات طور الموجة الحاملة تغيّرا بالطور الذي يسبب تغيّرا دوريا ملحوظا بمقدار عدة سنتيمترات في قياسات خطوط القواعد. تكتب الإشارة المباشرة والمنعكسة

$$A_D = A\cos\Phi_D$$
$$A_R = \alpha A\cos(\Phi_D + \Phi) \qquad 4.94$$

حيث

A_D مطال الإشارة المباشرة

A_R مطال الإشارة المنعكسة

α عامل الإخماد ($0 \le \alpha \le 1$)، *0*: لايوجد إنعكاس، *1*: قوة الإشارة المنعكسة تساوي قوة المباشرة

Φ_D وضعية طور الإشارة المباشرة

Φ إنحراف طور الإشارة المنعكسة بالنسبة لطور الإشارة المباشرة.

بجمع الإشارتين نجد:

$$A_\Sigma = A_D + A_R = A\cos\Phi_D + \alpha A\cos(\Phi_D + \Phi) = \beta A\cos(\Phi_D + \Theta). \qquad 4.95$$

وبإعتبار أن $A_{Dmax}=A$ و $A_{Rmax}=\alpha A$، فتكون معادلة الخطأ الناتج عن تعدد طرق الإشارة في قياسات الطور

$$\Theta = \arctan\left(\frac{\sin\Phi}{\alpha^{-1} + \cos\Phi}\right). \qquad 4.96$$

ويكون مطال الإشارة

$$B = \beta A = \sqrt{1 + \alpha^2 + 2\alpha\cos\Phi}. \qquad 4.97$$

وهذا يعني أنه من اجل $\alpha=1$ يكون الخطأ الأعظمي

$$\Theta_{max} = 90° \qquad 4.98$$

فمن أجل الموجة L_1 ($\lambda=19.05\ cm$) تبلغ قيمة الخطأ الأعظمي حوالي *5 cm*. من أجل تركيبات خطية للموجتين L_1 و L_2، تكبر هذه القيمة أو تصغر حسب التركيب الخطي. يمكن إختزال تأثير ال *multipath* على تعيين المواضع بواسطة القياس لفترة أطول، وهذا لايمكن تحقيقه في المسح الحركي أو الثابت السريع (فقرة *4.12.2* و *4.12.4*). لذلك ينصح بتجنب هذا التأثير أو العمل على تصغيره قدر الإمكان. بعض الإعتبارات الواجب إتخاذها لتحقيق ذلك:

- إختيار أماكن الرصد بعناية، بتجنب الأماكن أو الأجسام العاكسة
- إستعمال هوائيات مصمّمة بعناية (مثلا شرائط دقيقة، خاتم الخنق ...، فقرة *4.7.1*) وإستعمال صفيحة إضافية مخصّصة لهذا الغرض
- إستعمال مواد ماصة للإشارات جانب الهوائي.

توجد أيضا ظاهرة تعدد طرق الإشارة عند القمر الصناعي ولكن يبدو أن تأثيرها صغير جدا.

4.14.5 أجهزة الإستقبال *Receiving Systems*

أهم مصادر الأخطاء في أجهزة الإستقبال هي: تشويش اللاقط *receiver noise*، إنحرافات ناتجة بين القنوات *interchannel biases*، تغيّر تأخير الطور *phase delay variation*، عدم ثباتية مولّد الترددات *oscillator instability*، وتغيّرات مركز الطور في الهوائي *phase center variations*.

- يتعلق تشويش اللاقط بنسبة الإشارة إلى التشويش *signal/noise* لإشارة القمر. كقاعدة عامة فإن دقة قياس اللواقط التقليدية هي *1%* من طول الموجة. نحصل من أجل إشارات ال *GPS* على الدقات التالية:

C/A-code	$\lambda\approx300\ m$	تشويش $\approx 3\ m$
P-code	$\lambda\approx30\ m$	$\approx 30\ cm$
موجة حاملة	$\lambda\approx20\ cm$	$\approx 2\ mm$

تتميز اللواقط الحديثة بتشويش طور أقل من *1 mm* ودقة شيفرة عالية بحدود عدة سنتيمترات (فقرة *4.7.4*).

تظهر اللواقط متعددة القنوات تأخيرا مختلفا للإشارة في كل قناة من قنواته لأن كل إشارة تسلك طريق إلكتروني مختلف. لتعويض هذا الخطأ يتم اللجوء إلى تعيير القنوات مع بعضها. إن خطأ متبقي مقداره $5°$ يوافق خطأ مقداره *2.5 mm*، ويمكن أن يزداد كثيرا تحت تأثيرات هندسية. ينصح بإدخال هذا الخطأ أيضا ضمن المجاهيل التي تحسب في عملية الإستثمار، وخاصة في حال إستخدام القياس الرئيسي (الطور) دون مفاضلة.

– تغيّر تأخير الطور *phase delay variation* يتعلق بقوة إشارة القمر الصناعي. يمكن إختصار هذا التأثير إذا تم القياس لعدد وافر من الأقمار.

– تلعب عدم ثباتية مولّد الترددات *oscillator instability* دورا صغيرا في اللواقط الجيدة، لأن المعلومات الزمنية تأتي من إشارة القمر الملتقطة. يمكن حسابها أيضا في عملية التعديل. في حال متطلبات الدقة العالية، وفي الملاحة الدقيقة، ينصح بإستعمال مولّدات تردّد خارجية مستقلة (من الروبيديوم *rubidium* أو السيزيوم *cesium*).

– إن التوضع في الجيوديزيا والملاحة يستند على المركز الكهربائي للطور في الهوائي *phase center*، والذي يتغير حسب شدة وإتجاه الإشارات الساقطة عليه. في التطبيقات الدقيقة يجب معرفة مراكز الطور بدقة لكل أنواع الهوائيات المشتركة في المشروع الواحد. من أجل هوائي اللاقط *TI 4100* بلغ تغيّر مركز الطور *1-2 cm*، في الهوائيات الحديثة يبلغ التغير عدة ميليمترات.

يعين عادة المركز الميكانيكي للهوائي بدقة أقل من الميليمتر. مراكز الطور الكهربائية للإشارتين *L1* و *L2* يمكن أن تنحرف بعدة ميليمترات عن المركز الميكانيكي. في أغلب أنماط الهوائيات تعطى إحداثيات ثلاثية لتلك المراكز من قبل المصنّعين.

في حال إستخدام هوائيات من نفس النوع فإن تلك الأخطاء تحذف في عملية تفاضل القياسات (فقرة *4.9.1*). من أجل التطبيقات ذات المتطلبات عالية الدقة، ينصح بإستخدام هوائيات من نفس الأنماط في فتر قياسات واحدة *session*، وبعدها بتركيب *combining* فترات قياس *sessions* ذات أجهزه مختلفة بواسطة قياسات مكرّرة على نقاط مشتركة.

4.14.6 خلاصة *Summary*

تتعلق الدقة التي يقدمها نظام *GPS* في التطبيقات الجيوديزية، المساحية والملاحية بعدة شروط، مثلا:

– تشغيل لاقط واحد أو لواقط متعددة

– قياسات ذات تردد واحد أو ذات ترددين

– وجود عملية قابلية الإنتخاب *SA* أم لا

– وجود الشيفرة الدقيقة *P-code* أو عدمه

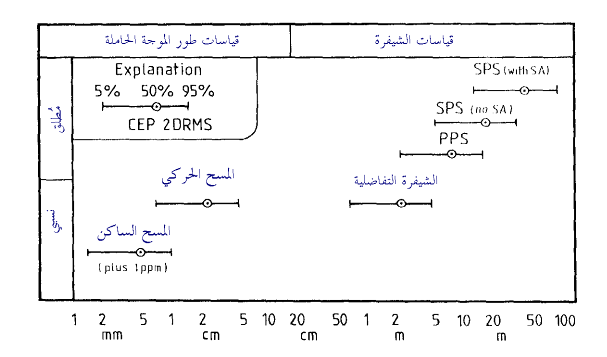
– طريقة توضع ثابتة أو حركية

– نتائج لحظية *real time* أو لاحقة *post-processing*

– إتساع عملية حساب المجاهيل، ودقة مدارات الأقمار الصناعية

– إستعمال طرق النقاط المعلومة الدقيقة *fiducial points concepts* أم لا.

الشكل *4.37* يعطي نظرة عامة عن دقة المسافة الممكن الحصول عليها بتطبيقات *GPS* تحت ظروف مختلفة.



شكل *4.37*: دقة تعيين الموقع في *GPS*.

تطلب دقة عالية في الأبحاث الجيوديناميكية العالمية، وفي إنشاء محطات أساسية *controls* لمراقبة وتدقيق الشبكات الدولية والوطنية. تم خلال السنوات الأخير تطوير الدقة الممكنة إلى مجال *1 ppm* حتى *0.1 ppm* بعد توفر اللواقط ثنائية التردد وطرق تحسين دقة مدارات الأقمار الصناعية *orbit improvement techniques*. كما أنه من الممكن الحصول على دقة تتراوح بين *0.1 ppm* و *0.01 ppm* بتطبيق طرق نقاط الإستناد المعلومة بدقة *fiducial points concepts* (فقرة *4.14.3*)، والطرق الدقيقة لتشكيل المدارات *refined orbit techniques*.

ترد عدة علاقات للتعبير عن الدقة في منشورات النظام المختلفة، منها مثلا

$$\frac{db}{b} = \sqrt{\frac{1}{2b}} \quad mm/km \qquad 4.99$$

حيث b هو طول القاعدة (km) و db خطأ القاعدة (mm).

وهناك معادلة أخرى أيضا

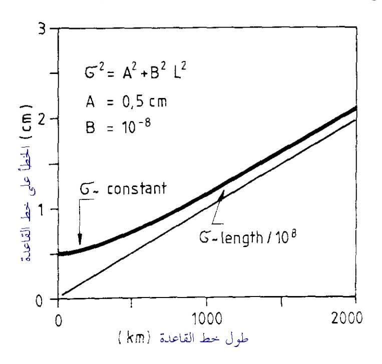
$$\sigma_{(baseline)} = \sqrt{A^2 + B^2 + L^2} \qquad 4.100$$

حيث

A الحد الغير متعلق بالمدار

B حد الأخطاء المرتبطة بالمدار وتزداد بإزدياد طول القاعدة

L طول القاعد (km). تقدّر A ب $0.5\ cm$ و B ب 10^{-8}. الشكل *4.38* يصف المعادلة *4.100*.



شكل *4.38*: دقة ال *GPS* المقدرة على خطوط قواعد طويلة.

يجدر ذكره أنه لا يمكن الحصول على دقة 10^{-8} بالعمل الإعتيادي اليومي، إنما تتطلب، كما ذكر، إستعمال طرق عالية الدقة لحساب المدارات، وتطبيق طرق نقاط الإستناد.

هناك نقطة هامة في الملاحة وهي أمانة النظام *system integrity*. تعرّف الأمانة *intergrity* في الملاحة بأنها قابلية النظام على تأمين تحذير في الوقت المناسب للمستعملين في حال كان النظام غير جاهز للإستعمال. يطلب هذا التحذير في تطبيقات الملاحة في الطيران المدني. إن قسم التحكم (فقرة *4.3*) لايستطيع تأمين تحذيرا كافيا في حال فشل إحدى مركبات النظام في عملها. تمت مناقشة عدة حلول للمسألة. في الطريقة الداخلية لمراقبة أمان النظام *internal method of integrity monitoring*، تؤمّن أمانة النظام من خلال معلومات من داخل اللاقط، مثل قياسات فائضة لأقمار إضافية. بإستعمال طرق خارجية لمراقبة أمان النظام *external methods of integrity monitoring*، يتم مراقبة إشارات النظام بشكل لحظي *real time* بواسطة شبكة من محطات المراقبة الأرضية. تبثّ المعلومات إلى المستعملين عن طريق قناة الأمان *GPS integrity channel* بواسطة قمر إتصالات مثل *INMARSAT*. إحدى الطرق الإضافية أيضا هي دمج معطيات اللواقط الملاحية مع معطيات من مجسّات *sensors* أو أجهزة أخرى مثل أنظمة الملاحة العطالية، لواقط نظام الملاحة الراديوي *LORAN-C*، أو لواقط نظام الملاحة السوفييتي *GLONASS*.

4.15 تخطيط وتحقيق القياسات *Planning and Realization of GPS Observations*

4.15.1 إنشاء مخطط الرصد *Setting up an Observation Plan*

كانت مرحلة التخطيط الأولية السابقة لعمليات الرصد *mission planning* تلعب دورا هاما ورئيسيا في أعمال نظام ال *GPS*، وذلك في الوقت الذي كانت فيه مجموعة الأقمار، من نمط *Block II* وما بعده، غير كاملة بعد (النظام في مرحلة الإكمال). في الوقت الحالي، بعد إعلان إنتهاء المرحلة النهائية ووضع النظام تحت تصرف المستعملين (في بداية عام *1994*)، فإن عملية التخطيط المسبقة لم تعد لها أهمية كبيرة، لأنه يمكن للمستعمل في كل وقت رصد أربعة أقمار (وغالبا أكثر) مستفيدا من التغطية الكاملة المؤمّنة من النظام على مدى *24* ساعة. رغم ذلك ترافق برامج إضافية أغلب برامج الإستثمار التجارية لحساب مواقع الأقمار التقريبية إنطلاقا من معطيات المدارات المنخفضة الدقة *almanac data* والتي توجد في الصفحتين الرابعة والخامسة من الخبر الملاحي *navigation message* (فقرة *4.5.4*). وهي تتضمن التقويمات لكل أقمار النظام، ويحتاج اللاقط، كما ذكر، فترة *12.5 min* لقرائتها. يتم بمساعدتها حساب إحداثيات تقريبية للأقمار الصناعية والتي تصلح لفترة عدة أشهر لخدمة غرض التخطيط المسبق للقياسات. بذلك يتم الحصول على رسم يدعى جدول رؤية الأقمار *visibility diagram*، ومعلومات عن جودة التوزع الهندسي لمجموعة الأقمار *PDOP* (فقرة *4.14.2*). حاليا، بعد إكتمال المرحلة النهائية للنظام، فإن قيم عامل تبعثر الدقة هي صغيرة في أغلب الأوقات، تقتصر أهمية معرفة قيم *PDOP* على التطبيقات الملاحية والحركية.

تتعلق طول فترة القياس على عوامل مختلفة منها: هدف المسح، نوع الأجهزة، الدقة المرغوبة، إمكانية البرامج المستخدمة، ظروف العمل والدعم، وحالة أقمار النظام.

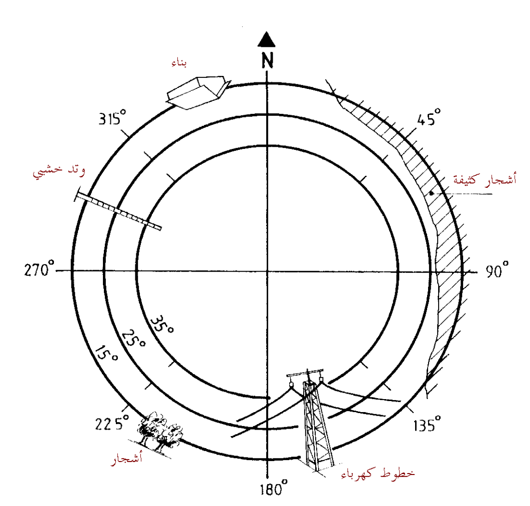
يلزم في المسح الدقيق، وبشكل أساسي، حلّ غموض الطور (فقرة *4.9.3*). في لحظة حلّ هذا الغموض تنتهي بذلك فترة القياس (القياسات اللاحقة في نفس الفترة ليس لها ضرورة). في المسافات القصيرة (لغاية *10 km*)، وبتوفر عدد أقمار كافي (*6* أو أكثر)، فإن طول فترة القياس يمكن أن يصبح *15* دقيقة أو أقل، وذلك بإستخدام لواقط ثنائية التردد مع شيفرة دقيقة *P-code*، وبرامج إستثمار (تجارية) متقدمة. يمكن التوصل في التطبيقات الحركية إلى دقة عدة سنتيمترات.

في المسافات الكبيرة، وفي ظروف بيئية صعبة، (إضطراب الإيونوسفير، تعدد طرق الإنتشار)، يحتاج المرء لقياس لفترة عدة ساعات للحصول على حلّ دقيق للغموض بقيمته الحقيقية.

في حال إنشاء شبكات أساسية وطنية أو قارية، وفي التطبيقات الجيوديناميكية، يمكن للقياسات أن تستمر لفترة يوم كامل أو حتى عدة أيام، وذلك للتغلب على تأثيرات أخطاء المدار، والعوامل الجوية *meteorological*، وتعدد طرق الإشارة *multipath*، والأخطاء الأخرى المتغيرة مع الزمن.

4.15.2 جوانب عملية في قياسات الحقل *Practical Aspects in Field Observations*

يجب إختيار مواقع نقاط *GPS* على الأرض بحيث تؤمن رؤية غير معاقة إلى الأقمار الصناعية والأفق (على الأقل لغاية *10* درجات)، وكذلك إمكانية الوصول إليها بالسيارة. في حال وجود عوائق ينصح برسمها وإنشاء مايدعى مخطط الظلال *shadow diagram* (شكل *4.39*).



شكل *4.39*: مخطط الظلال يبين العوائق الموجودة على زوايا إرتفاع أكبر من *10* درجات في نقطة *GPS*.

إن معايير إختيار النقاط هنا تختلف عنها في المساحة والجيوديزيا التقليدية. فمثلا ليس من الضروري إنشاء نقاط الشبكة من الدرجة الأولى على مرتفعات أو أبراج لتأمين رؤية متبادلة، إنما هناك حيث تلزم، ويكون الوصول لها بالعربات سهل وتتميز برؤية غير معاقة إلى الأعلى وإلى الأفق. وكذلك يجب تجنب الأماكن بقرب أبنية عالية وأبراج وخطوط التوتر العالي وهوائيات الإرسال. إن القرب من جدران او سطوح عاكسة يمكن أن يسبب تأثير تعدد الإشارة (فقرة *4.14.4.3*). يجب أيضا إختيار نقاط *GPS* بحيث تكون عمليات التمركز ممكنة بالأجهزة المساحية الإعتيادية من أجل عمليات المساحة الأرضية اللاحقة. ويفضّل أن تتوفر فيها إمكانية رؤية نقاط معلومة أخرى للتدقيق وتمكين الأعمال اللاحقة أيضا من القيام بالمسح التقليدي.

يفضّل إنشاء وصفا للنقطة *reconnaissance sheet* يتضمن كل المعلومات الهامة عن النقطة، مثلا:

إسم المحطة ورمزها، وصف المكان، إحداثياتها التقريبية وإرتفاعها، كيفية الوصول لها (سيارة، حالة الطريق، فترة السير على الأقدام)، إرتفاع الهوائي الضروري (ثلاثية أرجل، عمود)، علامات التوجيه عند إشارة النقطة، مخطط الظلال.

لم تعد التغذية الكهربائية، في الأجهزة الحديثة، تشكّل أي مشكلة كما هو الحال في الأجهزة التقليدية القديمة. إن بطارية *12* فولت خفيفة الوزن تكفي لقياس فترة يوم كامل، ولكن ينصح بشحنها كاملا قبل القياس. يحتاج تشغيل الأجهزة التقليدية (مثلا *TI4100*، *WM 102*) لأشخاص مدرّبين، للقيام بإعطاء المعلومات الأولية اللازمة للتشغيل وإختيار الأقمار، بينما تبدأ الأجهزة الحديثة القياس تلقائيا وتقتصر مهمة المشغّل *Operator* على مايلي:

التمركز على إشارة النقطة، قياس إرتفاع الهوائي، مراقبة عمل اللاقط، العمل وفق جدول زمني معطي، إستخدام صفحة مراقبة المحطة *station log* وقياس معطيات إضافية عند الطلب (المعطيات الجوية *meteorological data*، عناصر لامركزية نقطة التمركز).

تقوم الأجهزة التقليدية بتخزين القياسات على أشرطة تسجيل *cassettes*. بينما تكون الأجهزة الحديثة مزودة بذاكرات داخلية كافية أو ببطاقات ذواكر تركّب في مكانها قبل البدء بعمليات القياس وتنقل بعدها القياسات إلى الكومبيوتر مرة كل يوم أو بنهاية حملة القياسات. إن كمية المعطيات المسجّلة تكون ضخمة جدا في حال تعيين تواتر التسجيل *sampling rate* الأعظمي التي تؤمنه الأجهزة الحديثة (*1-2 sec*)، لذلك يلجأ، في مشاريع المسح الساكن *static survey*، لإستعمال تواتر التسجيل *15-30 sec*.

تطلب في بعض الحالات معلومات لحظية عن الأحوال الجوية (*meteorological data*) في عملية الحل متعدد المحطات *multi-station* اللاحقة. يجب أن يتم تسجيل تلك المعطيات بفواصل زمنية ملائمة (*30* دقيقة مثلا). يقاس الضغط الجوي بدقة *±1 mm* والحرارة بدقة *±1 C°*، والرطوبة النسبية بدقة *±1%*.

ينصح بعمل صفحة تدقيق المحطة *station log* تحتوي ليس فقط على قياسات العوامل الجوية، إنما أيضا على المعلومات التالية: إسم المحطة ورمزها، أرقام تمييز *identification numbers* اللاقط والهوائي المستعملان فيها، موقع الهوائي وإرتفاعه، الجدول الزمني للقياسات، رقم شريط التسجيل أو بطاقة الذاكرة، مشاكل التسجيل في حال ظهورها أثناء القياس ومعلومات هامة أخرى تفيد في عملية الإستثمار اللاحقة في المكتب.

4.15.3 طرق الرصد وتصميم الشبكات *Observation Strategies and Network Design*

يمكن تمييز طرق الرصد التالية:

– مبدأ توضّع نقاط *point positioning* (بإستعمال لاقط وحيد)

– مبدأ خطوط القاعدة *baselines* (قياسات نسبية على محطتين)

– مبدأ المحطات المتعددة *multi-stations* (ثلاثة لواقط أو أكثر تعمل بتزامن).

يتعلق إختيار طريقة القياس على نوع المسح، الدقة المطلوبة، عدد وأنواع اللواقط المستعملة، وظروف الإمداد *logistic*. إعتمادا على الدقة اللازمة، يمكن بشكل عام تمييز مجموعات المستخدمين وفق الجدول *4.13*.

المجموعة	الدقة النسبية الوسطية المطلوبة	الدقة الموافقة ب (*m*)، متعلقة بالمسافة المقاسة
A: الإستكشاف في الجيوفيزياء، نظام معلومات جغرافي *GIS*	1.10^{-4}	*1 ... 5*
B: مسح الخرائط الطبوغرافية، هندسة بمقاييس صغيرة، أنظمة مراقبة العربات	1.10^{-5}	*0.2 ... 1*
C: المسح العقاري، المسح الهندسي بدقة متوسطة	$5 ... 1.10^{-6}$	*0.01 ... 0.2*
D: جيوديزيا، مسح شبكات مراقبة، مسح هندسي عالي الدقة	$5.10^{-7} ... 1.10^{-6}$	$\leq 0.01 ... 0.05$
E: جيوديناميك، مسح هندسي ذو متطلبات دقة عالية جدا	1.10^{-7}	*0.001 ... 0.02*

جدول *4.13*: مجموعات مستخدمي ال *GPS*.

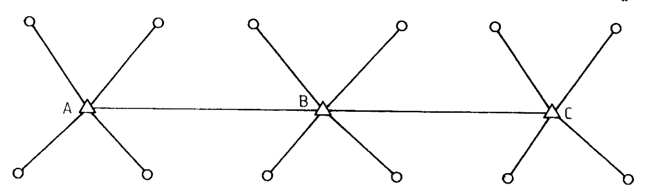
بإستعمال لاقط وحيد يمكن تعيين موضع بشكل مطلق بدقة *10-15 m* في غياب عملية *SA* (فقرة *4.6*) أو بإستخدام خدمة التوضع الدقيق *PPS*، وبدقة *30-50 m* أو أسوأ في حال وجود عملية *SA* أو بإستخدام خدمة التوضع المعياري *SPS*. بعد عدة أيام من القياسات لاتتحسن دقة التوضع المطلق أكثر من *±3-5 m*. تعتمد مجموعة المستفيدين الأولى *A* على قياسات من لاقط وحيد. من أجل الزمر الأخرى فتأتي طرق القياس النسبية فقط بالإعتبار، حيث يؤخذ لاقطين على الأقل يعملان بشكل متزامن، بعين الإعتبار. إن مبدأ القياسات النسبية موضّح بالشكل *4.28* من أجل المستخدم المتحرك. يطبّق المبدأ نفسه على الهوائيات الساكنة. إن قوة طريقة القياسات النسبية هي كون أجزاء من تأثيرات الأخطاء في المحطات

المتجاورة تكون مرتبطة مع بعضها البعض، وتحذف في عملية التفاضل (وخاصة أخطاء مدار القمر، أخطاء ساعات القمر مثل تأثير *SA*، وتأثير الإيونوسفير).

من أجل لاقط ثابت فإن التشويش المنخفض لقياسات الطور *2-3 mm* (الأصغر بثلاث إلى أربع مراتب من تأثير الأخطاء النظامية *m 1-10*، جدول *4.5* و *4.8*)، يمكن الإستفادة منه فقط في حال تم حذف المركّبات النظامية للأخطاء بواسطة القياسات النسبية.

تكون طرق القياس النسبية فعّالة بشكل خاص في القواعد الصغيرة بالمقارنة مع بعد القمر الصناعي (حوالي *20000 km*). يتناقص مقدار الإرتباط بإزدياد المسافة، ويبقى فعالا لغاية عدة آلاف من الكيلومترات. طرق تعديل القياسات النسبية مشروحة في الفقرة *4.11*

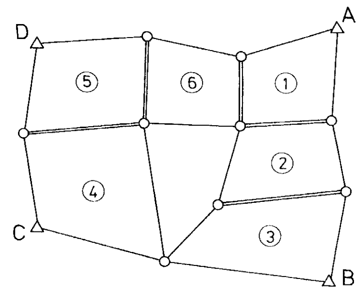
في حال العمل بلاقطين متزامنين، فيمكن إنشاء حقل نقاط أو شبكة بواسطة قياسات خطوط قواعد *baselines*. إحدى الإمكانيات هي تشغيل لاقط في نقطة مركزية وإشغال النقاط المجاورة بواسطة اللاقط الآخر بشكل نجمي (شكل *4.40*).



شكل *4.40*: قياسات خطوط قواعد بإستعمال لاقطين.

توصّل النقاط المركزية المتجاورة *A, B, C* بقياسات خطوط قاعدة. يتم إيجاد أطوال القواعد بين النقاط الغير متزامنة بواسطة الحساب. ويمكن أن تقاس إحدى تلك القواعد بشكل منفصل بهدف التدقيق.

إمكانية أخرى هي بإشغال نقاط متجاورة لتشكيل مثلثات أوأشكال رباعية (شكل *4.41*). تعطي هذه الطريقة دقة نسبية عالية وخاصة إذا قسمت الأشكال الرباعية إلى مثلثات، ولكنها تتطلب عملا كثيرا.



شكل *4.41*: شبكة *GPS*.

إن إستعمال عددا أكبر من اللواقط يكون إقتصاديا أكثر، حتى في الشبكات الصغيرة. فبإستعمال لاقطين يمكن إنجاز الشبكة في الشكل *4.41* بواسطة *14* فترة قياس *sessions*، بينما يتم إنجازها بواسطة *7* فترات قياس فقط بإستخدام ثلاث لواقط.

يجب ربط كل فترة قياس بفترة أخرى على الأقل بواسطة محطة مشتركة أو أكثر. إزديار عدد النقاط المشتركة يزيد في ثبات، دقة وموثوقية *reliability* حل الشبكة الكلّي.

في حال توفّر ثلاث لواقط أو أكثر فإن تصميم مخطط الرصد يعاني من مشكلة المعايير التالية: الإقتصادية، الدقة وموثوقية الحل. هناك إعتبارات أساسية يجب مراعاتها:

بإعتبار *r* عدد اللواقط المشغّلة بشكل متزامن

n عدد المحطات

m عدد المحطات المشتركة (لها أكثر من قياس في فترتي قياس مختلفتين)

s عدد فترات القياس *sessions*، ونعلم من الفقرة *4.12* أن *r(r-1)/2* عدد خطوط القواعد الممكنة في فترة قياس واحدة، و *(r-1)* عدد خطوط القواعد المستقلة *baselines* في فترة قياس واحدة. فإن عدد فترات القياس اللازمة في شبكة يكون

$$s = \left[\frac{n-m}{r-m}\right] \qquad 4.101$$

حيث تدوّر *s* إلى العدد الصحيح الأكبر. ويكون *s(r-1)* عدد خطوط القواعد المستقلة، و *(s-1)(m-1)* عدد خطوط القواعد المستقلة المعينة أكثر من مرة.

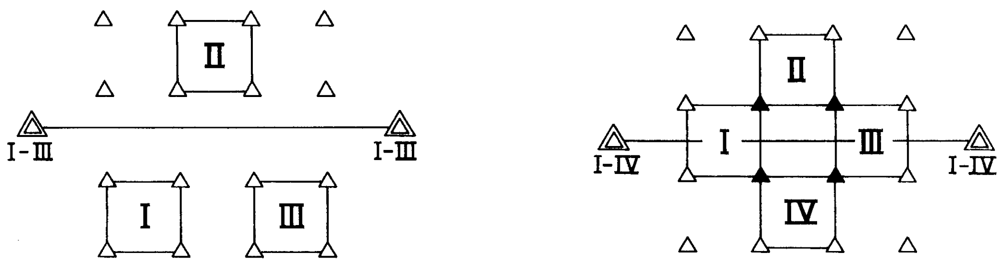
فبإعتبار إستخدام *4* لواقط ومحطتين مشتركتين للوصل بين فترات القياس المتعاقبة في الشبكة المبينة بالشكل *4.41* يكون لدينا:

13 محطة، 6 فترات قياس، 5 خطوط قواعد مكررة التعيين و *9* محطات معينة بتكرار. من الشكل نلاحظ انه تم رصد *4* محطات مرة واحدة، و*7* محطات مرتين ومحطتين ثلاث مرات.

إن إختيار طريقة القياس يعود إلى الخبرة بمساعدة بعض المعايير الشكلية. بإعتبار أن دقة شبكة *GPS* محلية أو إقليمية تكون مستقلة عن التباعد بين المحطات، فإن تصميم الشبكات يأخذ بعين الإعتبار عوامل الدعم *logistic*، الإقتصادية والموثوقية. بعض القواعد العامة المعتمدة على الخبرة في تصميم الشبكات:

- يفضّل أن يتم القياس على كل محطة مرتين تحت ظروف مختلفة للتمكن من إكتشاف الأغلاط
- يفضل إشغال محطات متجاورة بشكل متزامن وذلك لأن حل الغموض يكون جيدا وسهلا في القواعد القصيرة
- من أجل المشاريع المتوسطة الحجم فإن إستعمال *4-10* لواقط يعتبر إختيارا وسطا بإعتبار عوامل الإقتصادية، الموثوقية وناحية الدعم (الوصول إلى النقاط وحالة الطرق، حالة التغذية الكهربائية كالبطاريات وشحنها، ...)
- يفضّل رصد عدد معين من خطوط القواعد مرتين للتدقيق.

إن عامل الموثوقية *reliability* هام في نوعية شبكات ال *GPS*. ويعني قابلية الشبكة للفحص الذاتي للكشف عن الأغلاط *blunders* والأخطاء النظامية. الشكل *4.42* يعطي مثالا. المحطتين *1* و *2* تستعملان كمحطات مرجعية يتم القياس فيهما بشكل مستمر طوال كل فترات القياس. وهناك أربعة لواقط متحركة.



شكل *4.42*: شبكة ذات معيار دقة (يسار، ثلاث فترات قياس) وذات معيار الموثوقية (يمين، أربع فترات قياس).

القسم الأيسر من الشكل يبين تصميم شبكة يعتمد فقط على معيار عامل الدقة. القسم الأيمن يعطي بالتقريب الدقة نفسها، ولكن بالإضافة لذلك يعطي موثوقية للشبكة، لأن كل نقطة (المثلثات الغامقة) تستعمل في فترتي قياس. تقييد إضافي (وبالتالي تدقيق) يأتي من النقاط الأساسية الدائمة *1* و *2*.

إن مجموعة المعطيات الناتجة عن عملية تعديل متعدد المحطات تملك دقة نسبية عالية. ولكن الإحداثيات المطلقة يكون لها دقة عدة أمتار بسبب دقة النظام المرجعي المستعمل لذلك يجب إسناد شبكات ال *GPS* الجديدة إلى نقاط معلومة موجودة سابقا من الشبكة الوطنية الجيوديزية من المرتبة الأولى، أو من نقاط أساسية تم تعيينها مسبقا بواسطة إحدى طرق جيوديزيا الأقمار الصناعية مثل شبكات رصد *VLBI*، *SLR* أو *GPS*. كمثال على النوع الأخير هناك

- الإطار المرجعي الأرضي للخدمة الدولية لدوران الأرض *ITRF International Earth Rotation Service Terrestrial Reference Frame*

– *IGS* (فقرة *4.14.3*)

– شبكة ال *GPS* المدنية *CIGNET*

– شبكات ال *GPS* الوطنية أو الإقليمية، مثل جملة المراقبة الفعالة الكندية *ACS*

– شبكات ال *GPS* الوطنية أو الأساسية مثل المرجع الأوروبي *EUREF* والألماني *DREF*.

في حال تخطيط مشروع *GPS* يجب العناية الخاصة بربط القياسات إلى نقاط مرجعية ذات إحداثيات جيومركزية معروفة، وإلا فإن الأخطاء في الإحداثيات المطلقة تنتقل إلى الإحداثيات النسبية في الحل النهائي للشبكة. في حالة الشبكات الصغيرة تكفي نقطة إستناد واحدة.

بعد التزايد المستمر لكمية النقاط المعروفة الإحداثيات، والتابعة لشبكات وطنية، عالمية وقارية مختلفة، فإن طريقة النقاط الثابتة أو نقاط الإستناد *fiducial points* (فقرة *4.14.3*) ستكون الطريقة المطبقة بشكل إعتيادي في إنشاء شبكات ال *GPS* .

– *IGS* (فقرة *4.14.3*)

– شبكة ال *GPS* المدنية *CIGNET*

– شبكات ال *GPS* الوطنية أو الإقليمية، مثل جملة المراقبة الفعالة الكندية *ACS*

– شبكات ال *GPS* الوطنية أو الأساسية مثل المرجع الأوروبي *EUREF* والألماني *DREF*.

في حال تخطيط مشروع *GPS* يجب العناية الخاصة بربط القياسات إلى نقاط مرجعية ذات إحداثيات جيومركزية معروفة، وإلا فإن الأخطاء في الإحداثيات المطلقة تنتقل إلى الإحداثيات النسبية في الحل النهائي للشبكة. في حالة الشبكات الصغيرة تكفي نقطة إستناد واحدة.

بعد التزايد المستمر لكمية النقاط المعروفة الإحداثيات، والتابعة لشبكات وطنية، عالمية وقارية مختلفة، فإن طريقة النقاط الثابتة أو نقاط الإستناد *fiducial points* (فقرة *4.14.3*) ستكون الطريقة المطبقة بشكل إعتيادي في إنشاء شبكات ال *GPS*
.

4.16 أمثلة وتطبيقات Possible Application and Examples of GPS Observations

بإعتبار أن نظام ال *GPS* يمثل طريقة توضع دقيقة، إقتصادية، لحظية، تعمل تحت كل الظروف الجوية وجاهزه تحت التصرف بشكل متواصل فقد فتحت أمامه إمكانيات تطبيقات غير محدودة تقريبا في مجالات الجيوديزيا، المساحة، الملاحة ومجالات أخرى. من تلك الإمكانيات: مسح شبكات جيوديزية مرجعية *control surveys*، المسح العقاري، الجيوديناميك، مسائل التحكم والمراقبة، الملاحة الدقيقة، التصوير الجوي، الجيوديزيا البحرية وحركة الجليد.

إن نظام *GPS* هو نظام متعدد الأغراض، إحدى فوائده الرئيسية هي إمكانيته الكبيرة على إدماجه كإحدى مركبات أنظمة أخرى. نظام *GPS* مع نظام إحداثيات ومعلومات جغرافية ينتج خريطة. *GPS* مع خريطة يسهل الملاحة. *GPS* مع خريطة و*GIS* وربط معلومات *communication link* ينتج نظام قيادة وتحكم.

4.16.1 مسح شبكات جيوديزية مرجعية *Geodetic Control Surveys*

يمكن تمييز المجالات التالية:

– إنشاء حقل جديد من نقاط المراقبة الجيوديزية (شبكة جديدة)

– تكثيف أو توسيع الشبكات الموجودة

– فحص، تحليل وتحسين الشبكات الموجودة

– المساهمة في تعيين الإرتفاع والجيوئيد.

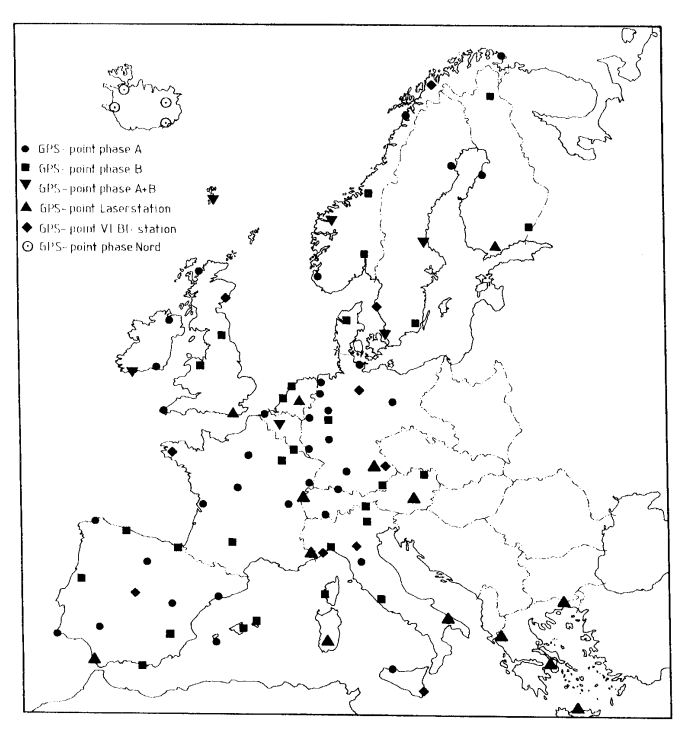
تتضمن عملية إنشاء شبكات جديدة ثلاثة مراحل. يفضل إختيار نظام مرجعي جيومركزي ملائم ومشابه للنظام الجيوديزي العالمي *WGS84*، لأن العمليات اللاحقة لتكثيف الشبكة سوف تنفّذ بإستخدام ال *GPS*. إن هذا النظام المرجعي *WGS84* معرّف بدقة *±1-±2 m*. لذلك من الأفضل إستخدام نظام *ITRF* المرجعي المعرف بدقة *±0.1 m* أو أدق، ويتوافق مع نظام *WGS84* بحوالي المتر الواحد. المناطق الغير مغطاة بنقاط نظام *ITRF*، مثل أغلب أجزاء قارة آسيا، جنوب أمريكا وأفريقيا، تغطى بنقاط *IGS* (فقرة *4.14.3*) بنفس مستوى الدقةسوف تقسم أنواع شبكات ال *GPS* المستقبلية إلى ثلاثة مستويات ذات مستوى الدقة العالي النظامي:

– المستوى *A*: الإطارات المرجعية القارية

– المستوى *B*: الشبكات المرجعية الوطنية

– المستوى *C*: قياسات ال *GPS* الأخرى.

يتم إنشاء شبكات *GPS* قارية بإستخدام نقاط إستناد من مجموعة *ITRF/IGS* وبطريقة نقاط الإستناد *fiducial points* المذكورة (فقرة *4.14.3*). هنا تكون المسافات بين النقاط *300-500 km*. يجب تعيين إحداثيات النقاط بأعلى دقة ممكنة *±1 cm*. وهذا ممكن بإستخدام طريقة نقاط الإستناد، قياسات لفترة حوالي إسبوع، لواقط ثنائية التردد، مدارات أقمار دقيقة وبرامج إستثمار متطورة. كمثال على ذلك مشروع الإطار الأوربي المرجعي *EUREF* (شكل *4.43*)، والذي يتضمن *90* محطة قياس. تمت القياسات عام *1989* بإستخدام *60* لاقط ثنائي التردد. وفي عام *1990* تمت إضافة *30* محطة جديدة أثناء حملة القياس *EUREF* الشمالية.



شكل *4.43*: الإطار الأوربي المرجعي *EUREF*.

هناك إطارات مرجعية أساسية مشابهة تم تحقيقها في قارات أخرى، مثل الولايات المتحدة الأمركية والموصولة مع النظام الجيوديزي المرجعي الوطني *National Geodetic Reference System NGRS* والمعتمد على مواقع معينة بطريقة *VLBI*، وكذلك في كندا والموصول بجملة المراقبة *GPS Active Control System ACS*.

يتم إنشاء شبكات *GPS* مرجعية وطنية أو قطرية (من فئة *B*) بتباعدات تبلغ *50-100 km*، وذلك حسب حجم البلد والأغراض المعتبرة. تثبّت الفئة *A* بإعتبارها نقاط إستناد. تكون دقة إحداثيات النقاط بالنسبة إلى النقاط المجاورة *±1 cm* أيضا لتأمين مجموعة متجانسة من الإحداثيات للبلد بكامله. كمثال على ذلك هو الإطار المرجعي الألماني *DREF* الذي قيس عام *1991* بواسطة *83* لاقط ثنائي التردد وتتألف شبكته من *109* محطات بتباعد متوسط *70-100 km*، منهم حولي *20* محطة تعود إلى الإطار المرجعي الأوربي *EUREF* من الفئة *A*.

ينصح بإستعمال عدد كبير قدر الإمكان من اللواقط لتأمين مجموعة قياسات متجانسة. في أغلب الحالات لن يكون ممكنا إشغال كل نقاط الشبكة الوطنية بشكل متزامن. تجزّأ عندها الشبكة الكاملة إلى أجزاء شبكات *sub-network* وإلى جلسات قياسات *sessions*. يتم وصل تلك الأجزاء الفردية مع بعضها بواسطة نقاط إستناد *fiducial points* من الفئة *A* المذكورة أعلاه، وبنقاط متطابقة *identical points* على أطراف كل جزء من الأجزاء. كمثال على ذلك تذكر شبكة ال *GPS* الأساسية في سويسرة والتي تحوي *100* محطة بتباعدات *30-40 km* والمقاسة ضمن أربع حملات قياسات، طالت الحملة الواحدة *10* أيام وتم إستعمال *8-10* لواقط في كل منها.

كل قياسات ال *GPS* الأخرى (فئة *C*) يجب أن توصل بالنقاط من الفئة *B* وبدقة *±1 cm*. إحدى الفوائد بالمقارنة مع الطرق التقليدية هي أنه لم يعد من الضروري تكثيف الشبكات وفق نظام معين، إنما يتم التكثيف حسب الحاجة وحسب جدول أولويات (أينما تطلب إحداثيات). التقسيم التقليدي إلى شبكات جيوديزية من الدرجة الأولى إلى الدرجة الرابعة، في بلد ما، سوف يختفي ويستعاض عنه بالتقسيم إلى المستويين التاليين:

- الإطار الأساسي الوطني المرجعي (مستوى *B*)
- كل المحطات الأخرى (مستوى *C*).

<u>طرق تكثيف الشبكات:</u>

1– في حال وجود شبكة أرضية تقليدية دقيقة من الدرجة الثانية أو الثالثة

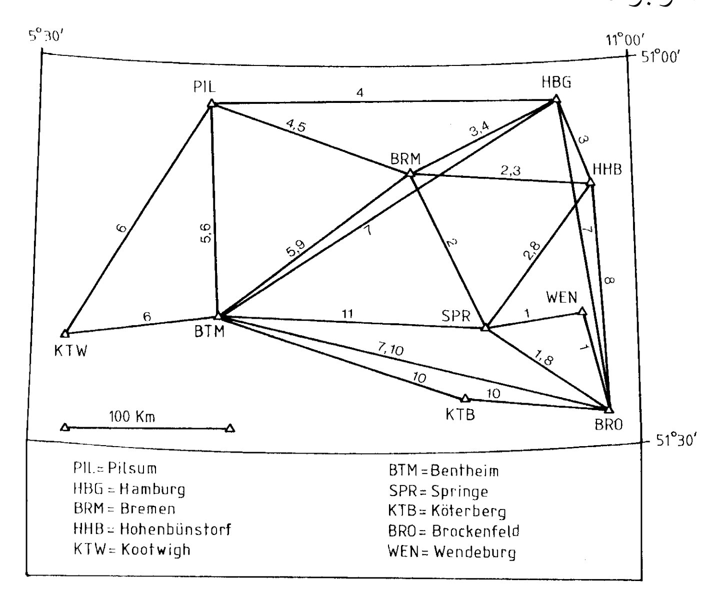
يستعمل ال *GPS* في هذه الحالة كأداة مسح حديثة لتكثيف الشبكات الدقيقة، وهو في كل الأحوال إقتصادي أكثر من الطرق التقليدية. تعتبر النقاط المثلثاتية كنقاط مرجعية ثابتة. تستعمل هذه الطريقة في بلاد عديدة لتأمين سريع لنقاط جيوديزية مرجعية دقيقة.

2– في حال وجود شبكات أرضية ذات دقة متوسطة أو متدنية، ويجب الحفاظ على الإحداثيات القديمة

في هذه الحالة يدخل تشوه الشبكة ضمن النتائج الدقيقة ل *GPS*. يستعمل ال *GPS* هنا كطريقة مكلفة لإستخراج إحداثيات في الشبكة الوطنية الموجودة. يجب الإحتفاظ هنا بقياسات ال *GPS* لإستعمالها في عملية تعديل *interpolation* دقيق في حال تم إنشاء شبكة *GPS* في المنطقة بالمستقبل. يقبل هذا الإجراء كحل وسط، وخاصة في الدول النامية، حتى يتم إنشاء شبكة وإطار كاملين معتمدين على طرق جيوديزيا الأقمار الصناعية.

3– الشبكة الأرضية الموجودة تركب مع قياسات *GPS*

يتم الحفاظ على الشبكة الموجودة، ولكن يعاد تعديل وتقوية الشبكة الكاملة بإدخال قياسات ال *GPS*. توصل نقاط جديدة إلى الشبكة بشكل مثالي. تتغير إحداثيات كل نقاط الشبكة بشكل طفيف. تعمل تلك الطريقة فقط في حال توافر معلومات إحصائية كافية عن الشبكة الموجودة.



شكل *4.44*: شبكة *NIENAC GPS* في شمال ألمانيا.

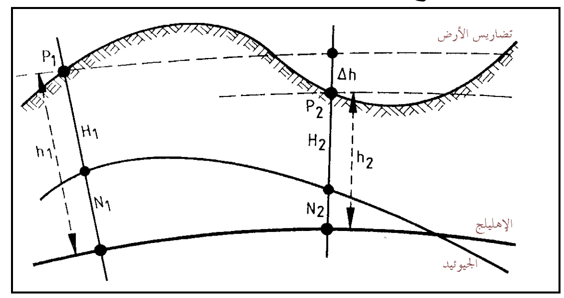
إن <u>تحليل الشبكة الموجودة</u> هو ذو أهمية خاصة في البلاد التي تتوافر فيها معلومات ضئيلة عن القياسات والحسابات الأصلية. ينطبق ذلك على أغلب البلاد النامية. يعطي تحليل الشبكات نظرة هامة في الشبكات الموجودة، حتى في البلاد ذات أنظمة الخرائط المتقدمة كألمانيا مثلا. يتم في عملية التحليل إعادة إشغال عدد معين من النقاط بواسطة لواقط *GPS*.

وتفحص الفروقات *residuals* بعد عملية تحويل ذات سبع وسائط *7 parameter Helmert transformation* (فقرة *2.1.1*). كمثال على ذلك شبكة *NIENAC GPS network* في شمال ألمانيا (شكل *4.44*).
تبيّن الأرقام على خطوط القواعد أرقام فترات القياس المختلفة *sessions*. لقد تمّ إنجاز تلك الشبكة عام *1986* بإستخدام *3* لواقط من نوع *TI4100* وخلال عشرة أيام من القياسات. تبين المقارنة مع الشبكة الأرضية (نفس المحطات) فروقات أقل من *5 cm*، وذلك في كل المركبات الثلاثة (جدول *4.14*).

Station	$d\varphi$(m)	$d\lambda$(m)	dh(m)
BRM	0.033	-0.005	0.054
PIL	-0.054	0.021	-0.027
HBG	0.025	-0.017	0.007
HHB	-0.038	0.008	-0.022
SPR	-0.035	-0.032	-0.035
BTM	0.057	-0.026	0.010
BRO	0.011	0.051	0.013

جدول *4.14*: الفروقات بعد عملية التحويل ذو الوسائط السبعة بين شبكة *NIENAC GPS* والشبكة التقليدية الألمانية *DHDN*.

لذلك تعتبر الشبكة الأرضية مناسبة لتكثيفها بواسطة *GPS*.
يعطي نظام ال *GPS* إحداثيات ثلاثية الأبعاد والتي يمكن تحويلها إلى إحداثيات إهليلجية، زاوية الطول λ، زاوية العرض φ والإرتفاع h. إن المركبة الإرتفاعية للإحداثيات h حساسة بشكل خاص للتوزع الهندسي للأقمار وأخطاء الأحوال الجوية *atmospheric refraction* الغير محسوبة. بينت الدراسات أن الخطأ في الإرتفاع يكون أكبر منه في المركبات الأفقية بمرتين. يمكن إستعمال ال *GPS* كطريقة جيدة لتعيين الإرتفاعات. تأتي هنا بشكل خاص فقط فروق الإرتفاعات بعين الإعتبار. من الواضح أن الإرتفاع h يمثل كمية هندسية بحتة، بينما يطلب عادة إرتفاعات مرتبطة بحقل الجاذبية الأرضية (فقرة *2.1.5*). العلاقة *2.40* تبين المعادلة بين العوامل المختلفة (شكل *4.45*):
h الإرتفاع على الإهليلج مستخرج من قياسات ال *GPS*
H الإرتفاع العمودي مستخرج من التسوية الدقيقة
N إرتفاع الجيوئيد مستخرج من حسابات إرتفاع الجيوئيد.



شكل *4.45*: العلاقة بين h، H و N.

لدينا من الشكل:

$$h_1 = N_1 + H_1 \qquad h_2 = N_2 + H_2$$
$$\Delta H = H_2 - H_1 \quad \Delta h = h_2 - h_1 \quad \Delta N = N_2 - N_1$$

$$\Delta H = \Delta h - \Delta N$$
$$\Delta N = \Delta h - \Delta H$$
$$\Delta h = \Delta H - \Delta N. \qquad 4.102$$

في حال معرفة إثنتين من المعلومات فيمكن حساب الثالثة:

– بتوفر إرتفاعات جيوئيد دقيقة يمكن إشتقاق إرتفاعات عمودية *orthometric hights* من قياسات ال *GPS* بهدف تدقيق التسوية أو إبدالها

– بتوفر معلومات عن التسوية الدقيقة وإرتفاعات إهليلجية من *GPS*، يمكن تعيين أو تدقيق الجيوئيد.

في حال توجب تحليل تغيّرات الإرتفاع فقط فيكفي التعيين التكراري للإرتفاعات بواسطة قياسات ال *GPS*. بناء على ذلك فهناك تطبيقات أساسية لقياس الإرتفاعات بواسطة *GPS*:

a– تغيرات الإرتفاعات من خلال تكرار قياسات *GPS*

b– تعيين الإرتفاعات العمودية بمعرفة الجيوئيد

c– تعيين الجيوئيد.

إن تغيّرات الإرتفاعات هامة في الجيوديناميك والمشاريع الهندسية وهي مذكورة في الفقرات *4.16.3* و *4.16.4*.

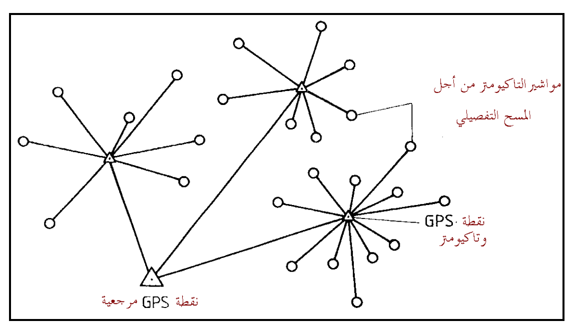
تعيين الإرتفاعات العمودية هو هدف بعيد، للإستعاضة عن التسوية الهندسية المكلفة والتي تستهلك وقتا طويلا. بإفتراض قوانين إنتشار الأخطاء البسيطة يمكن توقّع دقة إشتقاق الإرتفاع في مسار *GPS* بحوالي *0.1 m* على مسافة عدة آلاف من الأمتار. تم تحقيق هذا التوقع على مسار جيوئيد *geoid traverse* بإمتداد قدره *3000 km* في شمال أوروبا. التقييد الرئيسي لإمكانية التطبيق هذه هو وجوب توفّر معلومات جيوئيد دقيقة. تصل دقة الجيوئيد الوطني والإقليمي إلى مستوى عدة سنتيمترات (مثلا في ألمانيا). في منطقة الولايات المتحدة تصل دقة الجيوئيد *GEOID 90* (المحسوب من قبل *National Geodetic Service NGS*) إلى *10 cm* على مسافة *100 km* و *1 cm* بين نقاط تباعداتها بحدود *10 km*. في المقاييس الدولية فإن الجيوئيد ليس أدق من *1 m*. من أجل إستنفاذ قوة ودقة نظام ال *GPS* بشكل كامل في تعيين الإرتفاعات، يجب تحسين المعرفة بالجيوئيد.

في حال معرفة الإرتفاعات العمودية (إرتفاعات في حقل الجاذبية) لخطوط تسوية فإنه من الممكن إشتقاق إرتفاعات الجيوئيد مباشرة من نتائج ال *GPS*. هذه الطريقة تساهم بشكل كبير في التعيين السريع للجيوئيد الدقيق.

في حال إستعمال ال *GPS* للقياسات الإرتفاعية فيجب حل مشكلة رئيسية، وهي ربط علام إرتفاعي *tide gauge* وإنشاء نظام إرتفاعي عالمي *global hight datum*، وهذا يتضمن تعيين جيوئيد بحري دقيق وطبوغرافية سطح البحر. كما تنتشر الأخطاء في إحداثيات النقاط المرجعية إلى فروق الإرتفاعات الإهليلجية. كقاعدة تقريبية فإن خطأ في الموقع بمقدار *10 m* يسبب خطأ في فرق الإرتفاع بحوالي *2 ppm*.

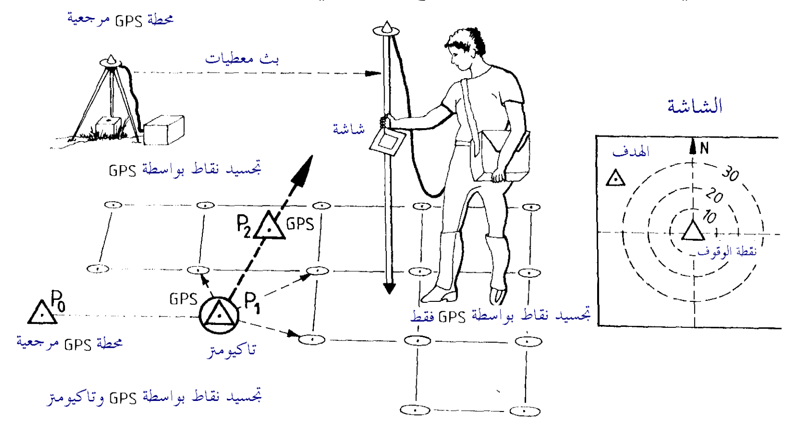
4.16.2 مسح عقاري ونظام معلومات جغرافية *Cadaster Survey and GIS*

بسبب الدقة العالية المرتبطة بزمن قياس قصير، فإنه يمكن توظيف ال *GPS* بشكل إقتصادي لتكثيف الشبكات على مسافات صغيرة جدا *1-10 km*. هناك إمكانيات تطبيق النظام في الريف والمدينة للمسح التفصيلي في المستقبل القريب، حيث يتم إستخدام مجموعة مركبة من أجهزة *GPS* وقوائس مسافات وزوايا (تاكيومتر). الشكل *4.46* يبين رسما تمثيليا لذلك. لقد تم حديثا إستعمال مايدعى محطة متحركة *mobile station* (وهي عبارة عن جهاز يحوي لاقط *GPS* وتاكيومتر يستعملان بنفس الوقت) لقياس ومراقبة الإنهيارات ودعائم خطوط السيور المتحركة على سفوح جبال الألب في النمسة.



شكل *4.46*: تركيب ال *GPS* مع تاكيومتر.

أهم مشكلة في المسح التفصيلي هي ظل الإشارة المسبب من الأبنية، الأشجار، الأبراج، الجسور وغيرها. لذلك سوف ينحصر إستعمال ال *GPS* على المساحات المفتوحة. بوجود تلك العوائق يستعمل عندها ال *GPS* بشكل أساسي للتعيين السريع لنقاط وقوف أجهزة التاكيومتر. في حالة الرؤية الحرة (نحو الأعلى والأفق) كما هو الحال في المناطق الريفية أو السكنية بشوارع عريضة وأبنية منخفضة ونسبة أشجار قليلة يمكن الإستفادة من فوائد طرق المسح السريع *rapid* (فقرة *4.12*). الشكل *4.47* يعطي تصورا تمثيليا عن المسح التفصيلي.



شكل *4.47*: إستخدام ال *GPS* في المسح التفصيلي.

يمكن أن تخزّن المعطيات في اللاقط المتحرك أو أن يتم إرسالها عبر موجات *data link* إلى اللاقط المرجعي، أو العكس. بإستخدام عملية الإرسال بشكل متواصل، يمكن تنزيل نقاط على الطبيعة أو التعرف على نقاط مجهولة أو ضائعة. تحسب الإحداثيات الدقيقة للّاقط المتحرك بالحقل مباشرة *real time*، ويدلّ المستعمل على المسافة والإتجاه الواجب التحرك بهما للوصول إلى نقطة الهدف.

يدعم ال *GPS* نظام المعلومات الجغرافية *GIS* بأوجه مختلفة:

- يساهم في الإطار الأساسي المرجعي الهندسي مثل نظام إحداثيات، مخطط على الكومبيوتر *digital plan*، أو شكل ثلاثي الأبعاد لقطعة أرض على الكومبيوتر *digital terrain model*
- يساهم في الموقع الهندسي للأجسام الداخلة في ال *GIS*، مثل شوارع، أبنية، خطوط الكهرباء والبترول، حدود بلدية
- يسمح ل *GIS* للعمل في الحقل بإدخال المواقع مباشرة بواسطة *GPS*
- يشكّل حجرة بناء ضمن نظام تحكم ومراقبة، مثل عربات متحركة أو آلات تجول على أساس مخطط كومبيوتر *digital terrain model*.

يؤمن نظام ال *GPS* معلومات عن التوضع بشكل مستمر في كل المقاييس وحسب الدقة المطلوبة.

4.16.3 في الجيوديناميك *Geodynamics*

إن الدقة العالية المؤمنة بأجهزة قابلة للنقل بسهولة، بالنسبة لغيرها، تجعل *GPS* طريقة ملائمة لتعيين حركات القشرة الأرضية *crustal movements*. حتى الوقت الحالي تم تحليل حركات القشرة الأرضية بشكل رئيسي بواسطة طريقة التداخل على القواعد الكبيرة جدا *VLBI* (فقرة *1.4.1*)، وطريقة قياس المسافات بالليزر *SLR* (فقرة *1.4.2*). يمكن تعيين أطوال كبيرة بدقة عالية بطريقة *VLBI*. يمكن التوصل لدقة عدة سنتيمترات على مسافة عدة آلاف من الكيلومترات. أهم مساوئ هذه الطريقة إتساع الأعمال التقنية والتقيّد بعدد قليل من النقاط الأساسية. يوجد حاليا عدد قليل من الأجهزة القابلة للنقل.

تم الحصول، بواسطة قياسات نظام الليزر *SLR*، على تحركات قشرة أرضية دقيقة وموثوقة خلال السنوات الأخيرة. تستعمل أيضا أجهزة قابلة للنقل. يحتاج القياس بواسطة ال *SLR* إلى كلفة عالية ووقت طويل للتنقل. يظهر نظام ال *GPS* بكل فوائده في مناطق عديدة من الأرض، وخاصة حيث تقاس مسافات بين النقاط بفترات ليست متباعدة كثيرا.

في حال التحضير لقياسات تحركات القشرة الأرضية، يجب الأخذ بعين الإعتبار أن نظام ال *GPS* يؤمن دقة نسبية $1x10^{-6}$ - $1x10^{-7}$ من المسافة بين محطتي قياس. من أجل *100 km* يعني هذا *10-1 cm* ومن أجل *1000 km* يعني هذا *100-10 cm*.

بالنظر إلى تغير حركة القشرة الأرضية التي تتراوح بين عدة سنتيمترات وعدة ميلليمترات بالسنة فيفضل ألا تزيد تباعدات النقاط كثيرا عن *100 km*. من أجل مسافات أطول يجب تطبيق طرق قياسات وإستثمار تؤمن دقة نسبية بحدود عدة أجزاء من 10^{-8} من المسافة. أهم العوامل المؤثرة التي تحد من الدقة هي: دقة المدارات وحساب الإنكسار الناتج عن الأحوال الجوية (التروبوسفير والإيونوسفير).

للحصول على دقة نسبية $1x10^{-7}$ يجب تعيين المدارات بدقة ± 2 *m* (فقرة *4.14.3*). دقة التقويمات المبثوثة أقل من هذا بعشرة أمثال. للحصول على دقة المدار المطلوبة يجب إما إستعمال التقويمات الدقيقة، أو يجب القيام بقياسات متزامنة لنقاط مرجعية ذات إحداثيات دقيقة معروفة للتمكن من تحسين المدار أو إعادة حسابه فوق منطقة العمل، وهذة الطريقة الأخيرة تدعى طريقة نقاط الإستناد *fiducial points concept*. يجب أن تكون نقاط الإستناد تلك معروفة بدقة السنتيمترات، مثلا محسوبة من قياسات ال *VLBI* أو *SLR*. يجب مراقبة الإنحرافات والتحركات في تلك النقاط، والناتجة عن تحركات تكتونية محلية أو قارية، بإنتظام. تعتبر نقاط الإطار المرجعي للخدمة الدولية لدوران الأرض *ITRF* ونقاط الخدمة الدولية للجيوديناميك *IGS* (فقرة *4.14.3*) متوضعة بشكل جيد.

في حال عدم التساهل بقبول أخطاء، ناتجة عن التروبوسفير، بحدود *1-3 cm* في شبه الطول الواحد (فقرة *4.14.4.2*)، فيجب العمل على رفع الدقة بإستعمال جهاز قياس بخار الماء *water vapor radiometer*.

تقع العديد من المناطق النشيطة من الناحية التكتونية (من ناحية حركة القشرة الأرضية) في المواقع ذات تشويشات إيونوسفيرية *ionospheric disturbancies* عالية، بقرب خط الإستواء الجيومغناطيسي أو في مناطق خطوط العرض الكبيرة (فقرة *4.14.4.1*). إن إستعمال لواقط ثنائية التردد ذات شيفرة دقيقة *P-code* يكون له في تلك الأحوال أهمية جوهرية. تساعد فترات القياس الطويلة (*24* ساعة على الأقل) على حذف التأثيرات المتبقية (مثل *SA*، أخطاء الساعة ...).

يمكن تمييز المجالات التالية لتطبيق مراقبة تحركات القشرة الأرضية بواسطة ال *GPS*:

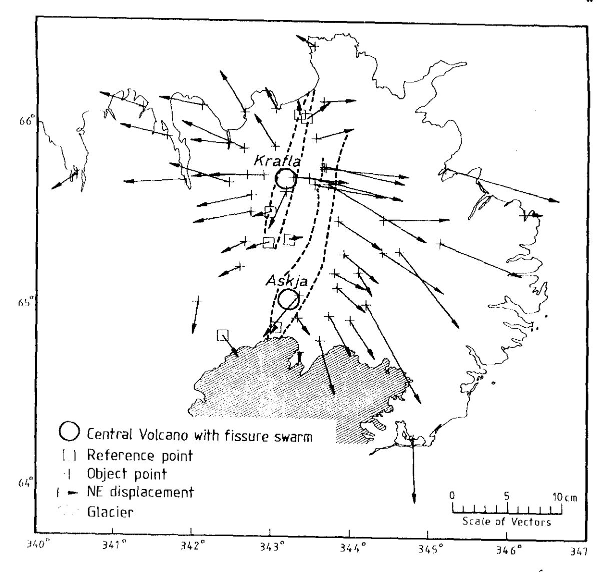
a– تحليل تشوهات وتحركات البلاطات *plates* القارية والدولية

b– تحليل تحركات القشرة الأرضية الإقليمية

c– مراقبة محلية للتشوهات والهبوطات.

لاتزال مشاريع الزمرة *a* قيد الدراسة. المقارنات بين نتائج ال *GPS* ونتائج ال *VLBI* توافقت على مستوى 1σ على مسافات لغاية *2000 km*، وأكدت إمكانية إستخدام ال *GPS* في المشاريع الجيوديناميكية العالمية *global*. في سياق هذا التطور فقد تم إنشاء شبكات رصد دائمة مثل شبكة *IGS*. هناك عدة إقتراحات لإنشاء شبكات مخصصة لمراقبة التشوهات، كشبكة مؤلفة من *200* محطة بتباعدات ذات *1000 km* تقريبا. تقدر الدقة ب *1 cm* بواسطة فترة قياسات يوم كامل و ب *1 mm* في حال فترة قياسات ثلاث أشهر. تتمثل الصعوبات في هذه الحالة بمعالجة كمية هائلة من المعطيات، لذلك يتم العمل على تلقي المعطيات لحظيا *on line*، تطوير طرق التحليل، التحكم باللواقط عن بعد، معالجة مسبقة للقياسات داخل اللواقط.

قدمت مشاريع الزمرة *b* نتائجا هامة، حيث تم البدء بدراسة كل المناطق تقريبا، النشيطة من الناحية التكتونية، في العالم. مثال على ذلك مشروع مركز وجنوب أمريكا *CASA GPS Project*، منطقة البحر المتوسط، ومشروع بحر مرمرة في تركيا *GPS-Project Marmara*، ...إلخ. الشكل *4.48* مثلا يبين نتائج حملتي قياسات في عامي *1987* و *1990* في المنطقة البركانية الشمالية في إيسلندة *Iceland*.



شكل *4.48*: أشعة الإنزياحات الناتجة عن حملتي قياس *GPS* متتابعتين في إيسلندة.

تم مراقبة حوالي *50* محطة بواسطة *7* لواقط من نوع *TI 4100* ثنائية التردد وذات شيفرة دقيقة *P-code*. بلغت دقة المحطات المتجاورة في كل حقبة قياس *1-2 cm*. تم تمييز إنزياحات بحوالي *3-5 cm/year*. إحدى أهم الصعوبات في تعيين الإنزياحات هي إختيار النقاط المرجعية الثابتة.

تم، في المناطق المهدّدة (زلازل،،نشاطات بركانية)، إنشاء شبكات مراقبة دائمة، حيث ترصد لواقط ال *GPS* كل الأقمار الموجودة طوال اليوم (*24/day*)، وترسل أو تبثّ القياسات إلى محطة مركزية تقوم بتحليل وتفحّص المواقع النسبية بين نقاط شبكة المراقبة. تشير تغيرات المواقع الملحوظة إلى تشوهات مسبّبة بنشاطات تسبق أو تلازم أو تلحق حدثا بركانيا أو ناتجا عن تحرك قشرة الأرض.

تعود مشاريع الزمرة *c* (مراقبة التشوهات المحلية) في أغلب الحالات إلى مجال تحليل التشوهات *deformation analysis* في المساحة الهندسية. يمكن ذكر تطبيقات ممكنة:

– هبوطات الأرض، مثلا في مناطق المناجم وحقول البترول

– إنزلاق الأرض *land sliding* (مثلا في المقالع الضخمة وإنهيارات سفوح الجبال)

– حركات القشرة الأرضية المحلية *local geotectonics*.

تكون التباعدات بين النقاط في أغلب الحالات صغيرة جدا (حوالي *1 km*)، لذلك يمكن التوصل لدقة عدة ميلليمترات، ويمكن إكتشاف التشوهات الصغيرة جدا. تكرّر القياسات بفترة دورية (أيام، أسابيع، أشهر) وذلك حسب التشوهات المتوقعة. يجب توفر محطة مرجعية ثابتة على الأقل. يمكن، في عدة حالات، تطبيق طرق القياس الساكنة السريعة أو النصف حركية (فقرة *4.12.2*، *4.12.3*).

4.16.4 في المسح الهندسي والمراقبة *Engineering and Monitoring*

يمكن إدخال عدد غير محدود تقريبا من إمكانيات الإستعمال والتطبيقات في هذا المجال، حيث تبقى طرق القياس والإستثمار نفسها كما وردت في الفقرات السابقة. وبإعتبار أن الأطوال المعالجة هنا تكون قصيرة فيمكن التوصل إلى دقة الميلليمترات بالطرق الروتينية. بعض مجالات التطبيقات:

1– تعيين نقاط مراقبة جيوديزية من أجل:

- علم رسم الخرائط *Cartography*
- نظام معلومات جغرافية *GIS* (مثلا مسح طريق بواسطة *GPS* على سيارة وإدخال معلومات عن النقاط المخزنة مباشرة لتشكيل قاعدة معلوماتية وخريطة *GIS*)
- التصوير الجوي *Photogrammetry* (كتعيين دقيق لموقع عدسة الكاميرا في الطائرة)
- المسح الجيوفيزيائي *Geophysical Surveys*
- المسح العطالي *Inertial Surveys*
- موضع الهوائي في المسح المائي *Hydrographic Survey*
- الشحن بكل أنواعه *Expeditions*
- رسم خرائط الآثار القديمة *Archaeological Mapping*

2– مراقبة تحرك أجسام بواسطة قياسات متكررة أو مستمرة

- هبوطات الأرض *Ground Subsidence* (مناجم، تراجع مستوى المياه الجوفية)
- إنزلاق الأرض *Land Siding*
- منشآت السدود *Construction of Dams*
- هبوطات المنشآت الشاطئية *Subsidence of Offshore Structures*
- ثبات الأبنية *Settlement of Buildings*

3– إنشاء شبكات محلية لمراقبة المشاريع الهندسية

- مشروع نفق *tunnel Construction*
- مشروع جسر *Bridge Construction*
- مشروع طريق *Road Construction*
- خطوط البترول أو الغاز *Pipe Lines*
- الممرات المائية *Waterways*

4– القيادة الآنية *Real-Time Guidance* والتحكم بالعربات

- عربات الإنشاءات *Construction Vehicles*
- الحفارات الكبيرة *Excavators* في المناجم المفتوحة (والمقالع)
- أجهزة الحمل والنقل *Forklifts* في مناطق المستودعات المفتوحة.

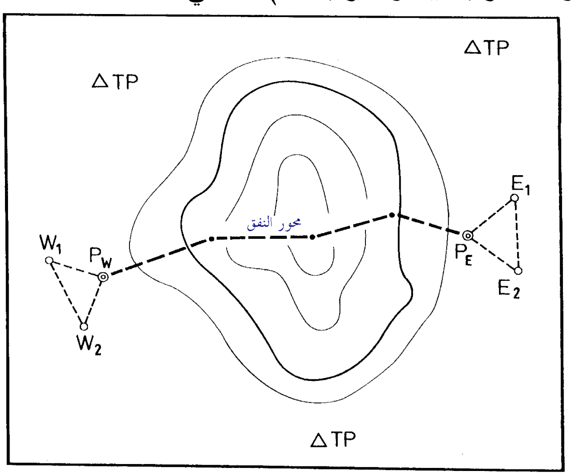
يمكن إستعمال لاقطي *GPS* لتعيين إتجاهات. يشتق الإتجاه عادة من إحداثيات موضعي مركزي الطور في الهوائيين المعتبرين، لذلك يتوجب هنا حل الغموض (فقرة *4.9.3*). الجدول *4.15* يعطي نظرة عن الدقة النسبية المطلوبة لحدود الأخطاء في قياس السموت.

	دقة السمت في الثواني				
	1	2	4	6	10
تباعد النقاط (*m*)	دقة ال *GPS* النسبية (*mm*)				
100	-	1	2	3	5
200	1	2	4	5	10
300	2	3	6	9	14
400	2	4	8	12	19
500	3	5	10	14	24
600	3	6	12	18	29

جدول *4.15*: دقة تعيين الإتجاهات بواسطة *GPS*.

في حال إعتبار حدود دقة التوضع النسبية هي *2 mm* فيمكن تعيين سمت ثانية واحدة على مسافة *400 m*. يمكن أن يفيد ذلك بعملية تنزيل محاور نفق. يدرج فيما يلي مثالين عن التطبيقات الممكنة المذكورة في هذه الفقرة.

يمكن إظهار فوائد نظام ال *GPS* في شبكة مراقبة لإنشاء نفق. الغرض الرئيسي لتلك الشبكة هي تنزيل إتجاه خط الممر الرئيسي على كلا المدخلين (البوابة الغربية P_W والشرقية P_E) كما في الشكل *4.49*.

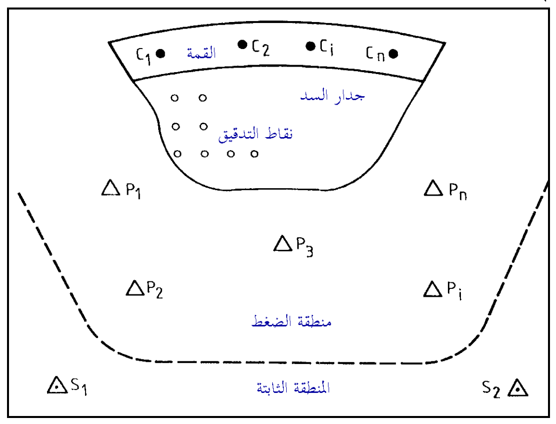


شكل *4.49*: شبكة نفق عامة بواسطة *GPS*.

يتوجب، في الهندسة التقليدية، وصل النقطتين P_W و P_E بواسط شبكة تربط بينهما وتمتد على كل المنطقة التي تكون عادة جبلية أو مليئة بالغابات، حيث يشكل ذلك صعوبات إضافية لظروف العمل وزيادة بالكلفة. يكفي بواسطة ال *GPS* تعيين نقطتي مراقبة تقع كل واحدة على أحد مداخل النفق. وينصح، للأمان، إنشاء نقطة هدف أخرى على كل مدخل من أجل الإتجاهات المرجعية، ويفضّل ألا تكون المسافة كبيرة كي تأمّن الرؤية أيضا تحت ظروف جوية سيئة. الجدول *4.14* يبين أنه على مسافة *400 m* يمكن إشتقاق الإتجاة المرجعي بواسطة ال *GPS* بدقة زاوية تساوي *±1* ثانية ستينية. يمكن تعيين الموقع النسبي لكل من نقاط المدخل *portal points* بدقة *1 cm*. النتائج تكون معطية بإحداثيات ثلاثية الأبعاد. لتأمين إرتفاعات تسوية (عمودية) يجب معرفة معلومات دقيقة عن الجيوئيد المحلي. يمكن، حين الطلب، ربط نقاط المدخل بنقاط الشبكة العامة للبلد *trigonometric stations TP*.

المثال الثاني يظهر مراقبة دائمة لسد أثناء وبعد إكمال تنفيذه. المهمة الصعبة هي إختيار نقاط مراقبة ثابتة، وتمييز حدود منطقة الضغط عن المنطقة الثابتة. تطلب عادة نصائح الخبراء والمختصين. إحدى فوائد نظام ال *GPS* هي أن

نقاط المراقبة الثابتة S_i يمكن أن تقع بعيدة عن منطقة التأثير والعمل، ولاحاجة لتحقيق شرط الرؤية المتبادلة للنقاط القريبة من المنشأة P_i (شكل *4.50*).



شكل *4.50*: مراقبة سد بواسطة *GPS*.

يمكن هنا إستعمال ال *GPS* للأغراض التالية:

- إنشاء نقاط مراقبة ثابتة S_i
- إنشاء ومراقبة نقاط المراقبة P_i في منطقة الضغط
- إنشاء نقاط مراقبة C_i على قمة السد.

تجري مراقبة نقاط التدقيق *check points* المتخذة على جدار السد (جسم السد) بطرق أخرى مثل أجهزة التاكيومتر الإلكترونية أو التصوير. يتم بواسطة ال *GPS* تعيين ومراقبة مواقع نقاط وقوف الأجهزة (التاكيومتر، أو الكاميرات) P_i في منطقة الضغط *pressure zone* (شكل *4.50*). بإعتبار دقه ال *GPS* العالية والكلفة المنخفضة يمكن إنشاء شبكة مكثفة من نقاط المراقبة في منطقة الضغط هذه. يمكن حساب التشوهات من قياسات دورية بفترات زمنية، أيام، أسابيع، أو أشهر، وذلك حسب الحالة. في حالات الشك بقرب حدوث تغيرات إنشائية، فيمكن الأخذ بعين الإعتبار إنشاء مجموعة من نقاط المراقبة المتواصلة *continuous*.

4.16.5 الملاحة الدقيقة، الجيوديزيا البحرية والدراسات المائية *Precise Navigation, Marin Geodesy and Hydrography*

بسبب قابلية النظام على العمل بشكل لحظي *real time*، جاهزيته المتواصلة ودقته العالية، فإن هذا المجال لإستعمال نظام ال *GPS* واسع ويتطور بسرعة. يمكن تقسيم التطبيقات الممكنة والدقة المرغوبة إلى ثلاث زمر من المستعملين:

a– متطلبات دقة متدنية، *100 m* في الموقع و *1 m/s* في السرعة

b– متطلبات دقة متوسطة، حوالي *1-10 m* في الموقع والإرتفاع و *0.1 m/s* في السرعة

c– متطلبات دقة عالية، أفضل من *0.1 m* في الموقع والإرتفاع و *0.01 m/s* في السرعة.

يكفي لمستعملي الزمرة *a* لاقط ذو شيفرة نظامية *C/A-code* موجود على قارب، وحتى تحت تأثير عملية *SA*. يؤمن نظام ال *GPS* دقة توضع ثنائية الأبعاد حوالي

± 100 m في خدمة التوضع النظامية *SPS*، و

± 10-20 m في خدمة التوضع الدقيق *PPS* (فقرة *4.6*)، للمستعملين أصحاب الترخيص.

في حال عدم تشغيل عملية *SA* فإن لاقط ذو شيفرة نظامية *C/A-code* يعطي دقة توضع بحدود *± 30 m*. الدقات المذكورة تكفي لعدة أغراض في مجال البحرية. بعض مجالات التطبيق للزمرة *a* مثلا:

1– مهمات ملاحية عامة في أعالي البحار

2– الأبحاث في علم المحيطات

3– مواقع القوارب في علم قياس الأعماق *bathymetry*

4– الموقع والسرعة في قياسات الجاذبية *gramvimetric*، المغناطيسية *magnetic*، والموجية *seismic* الكبيرة المقياس.

من أجل التطبيقات في المجالات 3 و 4، فإن دقة لاقط وحيد تحت تأثير عملية *SA* لاتكفي. ففي تلك الحالات ومن أجل تطبيقات أخرى مثل الجيوديزيا البحرية *marine geodesy*، والمساحة البحرية *hydrography*، الملاحة الدقيقة (مستعملي الزمرة *b*)، يجب تشغيل ال *GPS* بالطريقة التفاضلية *DGPS* (فقرة 4.13). في حال طلب مواقع دقيقة بشكل آني يجب عندها إرسال التصحيحات التفاضلية إلى المستعمل (شكل 4.28). يفضّل إرسال تصحيحات الأطوال المقاسة (إلى الأقمار) عوضا عن إرسال تصحيحات المواقع. تقيس المحطة المرجعية المعلومة الأبعاد إلى كل الأقمار الممكن رصدها وترسل التصحيحات إلى لاقط المستعمل الذي يقوم بإدخالها على الأبعاد (شبه الأطوال) المقاسة للأقمار التي رصدها ويحسب موقعه إعتمادا على الأطوال المصحّحة. تم تحديد شكل *Format* التصحيحات المرسلة من قبل اللجنة الهندسية الراديوية للخدمات البحرية *Radio Technical Commitee for Marine Services RTCM*. ولها تواتر قدرة 50 *baud* (50 عنصر بالثانية *bit per second*). وهناك محطات ترسل التصحيحات بشكل متواصل للمستعملين في المناطق الملاحية النشطة، مثل خليج المكسيك وبحرالشمال. وتطبق الآن أيضا عملية إرسال تلك التصحيحات عبر أقمار الإتصال مثل قمر *Inmarsat*، أو الإرسال عبر الراديو.

هناك مجالات تطبيقات تقليدية لمستعملي الزمرة *b* مثلا:

– الملاحة الدقيقة في المياه الإقليمية
– طرق المرافئ (توجيه السفن)
– تشكيل خرائط قعر البحر لأغراض علمية وغيرها (شكل 4.52)
– المراقبة الآلية لهبوط الطائرات في المطارات المدنية
– المساحة البحرية
– مسح ثقالي وموجي دقيق
– تعيين مواقع المجسات التحت مائية بما يخص الثروات الأرضية تحت البحر.

يمكن أيضا حساب المواقع لاحقا في المكتب في حال لم يطلب التوضع اللحظي، ولكن هذا يسبب مشكلة حفظ ونقل كمية هائلة من القياسات. ينصح بشكل عام إستخدام القياسات لحظيا *real time* وعدم تخزينها.

في حال إستخدام قياسات الطور لتهذيب وتصفية قياسات الشيفرة في المحطة المرجعية فيمكن تأمين دقة *2-3 m* للهوائي المتحرك في عملية ال *DGPS*.

هناك مستعملون يحتاجون إلى دقة توضع أكبر (زمرة *c*)، يستعمل في تلك الحالة طور الموجة الحاملة كقياس رئيسي ويتوجب أيضا حل الغموض. كما يجب تطبيق الطريقة الحركية البحتة *pure kinematic* (فقرة 4.12.4) وطريقة حل الغموض بالطيران *on the fly*.

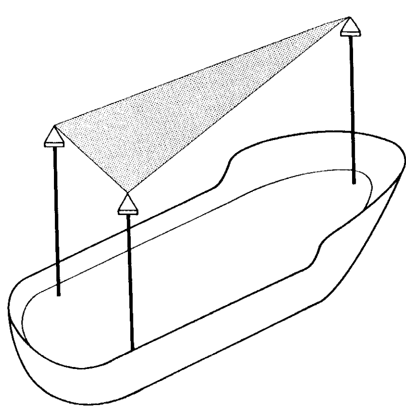
بعض التطبيقات الممكنة في زمرة المستعملين *c*:

– المساحة البحرية الدقيقة
– مراقبة تراكم الطمي في الأنهار، البحيرات، المياه الإقليمية ومناطق الموانئ
– قيادة ومراقبة آليات رفع الوحل أو الردم من قاع البحر *dredge* بشكل آني *real time*
– دعم الهندسة الشاطئية
– جيوديناميك البحري *marine geodynamics*

وهناك مجالي تطبيقات خاصة:

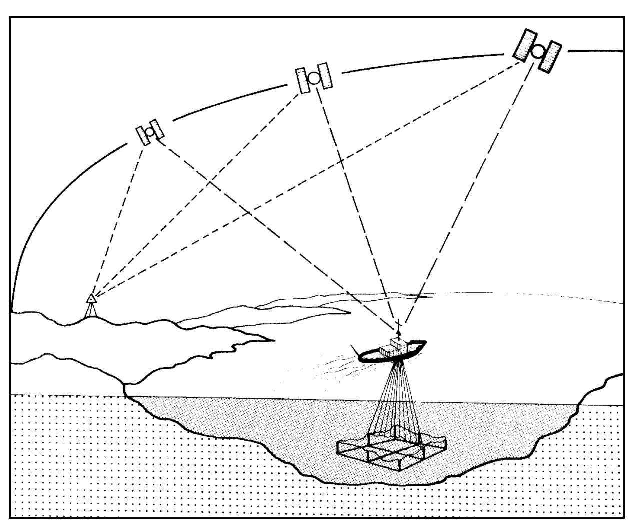
- مراقبة دقيقة ومتواصلة للإرتفاعات
- مراقبة وضعيات *attitudes* السفن، والطوافات *buoys* والمنشآت العائمة *floating platforms*.

من أجل القياسات بالأمواج الصوتية *echo-sounding* ومراقبة سطح البحر، يطلب تعيين الإرتفاع بإستمرار وبدقة السنتيمترات. بواسطة وضع ثلاث هوائيات لثلاث لواقط على السفينة يمكن مراقبة تغيّر وضعية السفينة مع الزمن وبشكل لحظي *real time* (شكل *4.51*).



شكل *4.51*: مراقبة الوضعية بواسطة ثلاث لواقط *GPS*.

أظهرت التجارب أنه يمكن الحصول على دقة *±0.01°* في السمت *azimuth*، و*0.25 mrad* في الميل الأمامي *roll* والتمايل الجانبي *pitch*، و *1 cm* في تشوه السفينة. مراقبة الوضعية هذه لها أهمية كبيرة في تصحيح الإنحراف لأنظمة القياس بالموجات الصوتية متعددة الترددات *multibeam sonar systems* أثناء عملية رسم خريطة قعر البحر (شكل *4.52*).



شكل *4.52*: رسم خريطة قعر البحر بإستخدام نظام الموجات الصوتية و *DGPS*.

4.16.6 التصوير الجوي والإستشعار عن بعد *Photogrammetry and Remote Sensing*

يساهم هنا إستعمال ال *GPS* بطرق مختلفة:

a– تعيين نقاط مراقبة أرضية

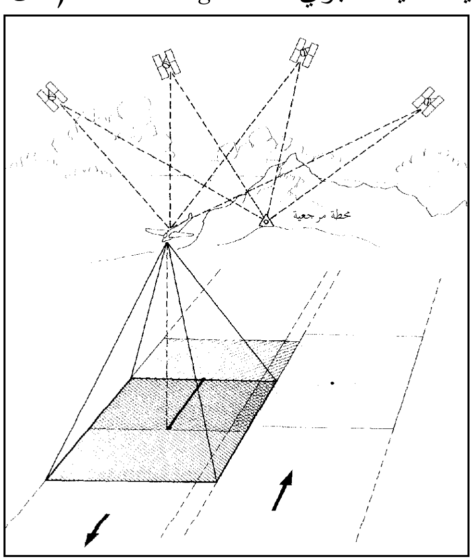
b– ملاحة طائرات التصوير الجوي

c– تعيين إحداثيات وتوجّه مجموعة المجسّات *sensor platform*

إن تعيين نقاط مراقبة أرضية من أجل إنتاج خرائط تصوير جوي (زمرة *a*) ينفّذ حسب طرق الفقرة *4.16.1*. يتم إختيار الطريقة حسب مقياس الخريطة المرغوب. من أجل الأغراض العقارية فإنه يمكن الحصول على دقة السنتيمتر بواسطة تعديل أطوار الموجات الحاملة. يجب عادة ربط منتجات التصوير الجوي (خرائط) بالشبكة العامة للبلد بواسطة نقطة مراقبة على الأقل بإحداثيات معروفة. في الصور الجوية تكون متطلبات الدقة لنقاط المراقبة الأرضية أقل بكثير (مثل صور القمر *SPOT*، *LANDSAT*). يمكن الحصول على دقة *1-5 m* بواسطة الطرق التفاضلية بإستعمال قياسات الشيفرة أو قياسات الشيفرة المنقّحة بمساعدة أطوار الموجات الحاملة، بدون حل الغموض (فقرة *4.13*). يمكن للاقط المتحرك ان يعمل على مسافة لغاية عدة مئات من الكيلومترات. يكفي القياس لفترة دقائق في النقطة المطلوب تعيينها.

من أجل الملاحة الدقيقة (زمرة *b*) يستعمل *DGPS* وإرسال المعطيات *data link* بشكل لحظي *real time*. يكفي عادة إرسال تصحيحات أشباه الأطوال للحصول على دقة *10 m*، طالما هناك أربعة أقمار متوفرة.

أهم مساهمة لنظام ال *GPS* في التصوير الجوي هي تعيين توجّه المجس *sensor orientation*، خاصة موقع الكاميرة الدقيق (زمرة *c*)، بغرض تحقيق عملية التثليث الجوي *aerial triangulation* (شكل *4.53*).



شكل *4.53*: إستعمال ال *GPS* في تعيين مواقع الكاميرة في عملية التثليث الجوي.

يتم إدخال مواقع الكاميرة، المعينة بواسطة ال *GPS*، كقياسات دقيقة في عملية التعديل المركّبة. كنتيجة لذلك يختصر عدد نقاط المراقبة الأرضية اللازمة إلى *10%* أو أقل من عدد النقاط المطلوبة في عمليات التثليث التقليدية.

للحصول على الدقة المطلوبة بمقدار حوالي *±5 cm* فمن الضروري تحقيق مايلي:

- العمل بالطريقة التفاضلية
- إستعمال معطيات الشيفرة وأطوار الموجات الحاملة
- حل غموض الطور.

من الضروري تطبيق طريقة حل الغموض بالطيران *on the fly*، بسبب ظهور قفزات القياس أثناء إنعطاف الطائرة بين خطوط التصوير المختلفة. يعتبر اللاقط ثنائي التردد ذو قنوات قياس كافية لكل الأقمار وذو شيفرة دقيقة وتشويش قياس منخفض، ملائما لهذا التطبيق. يجب أخذ الأمور التالية بعين الإعتبار:

- تزامن عمل اللاقط والكاميرة
- اللامركزية بين مركز طور الهوائي ومركز إسقاط الكاميرة
- فقدان الإتصال مع الأقمار وظهور قفزات قياسات أثناء المنعطفات.

تؤمن اللواقط الحديثة عملية التزامن، تقريبا، مع فتحة عدسة كاميرة التصوير الجوي. في اللواقط العادية لايمكن التحكم بنقطة القياس الزمنية، لذلك يجب العمل على توافق فتحة العدسة في الكاميرة بتدخل المستعمل. بإعتبار سرعة الطيران فإن تأثير خطأ التزامن هذا يمكن أن يصل إلى عدة أمتار.

تتضمن اللامركزية، بين مركز طور الهوائي ومركز إسقاط الكاميرة، المسافة وزوايا التوجيه الثلاثة. يجب قياس المسافة بالطرق التقليدية لأنها تبقى ثابتة، بينما يمكن تعيين التوجيه بإحدى الطرق التالية:

- بواسطة مجموعة معتمدة على ال *GPS* بإستخدام ثلاث لواقط وهوائيات (فقرة *4.16.5*)
- كنتيجة جانبية لنظام ملاحة عطالي في حال إستعماله على متن الطائرة
- بواسطة مقياس الميول *inclinometer*.

للتغلب على مشكلة فقدان الإتصال بالأقمار الصناعية أثناء إنعطافات الطائرة، وبالتالي ظهور قفزات قياسات *cycle slips* ، فيجب إعتبار مجهول غموض إضافي وحلّه، وهذا يوجب تطبيق طريقة الحل بالطيران *on the flay*. أو يمكن تصحيح فترة فقدان المعطيات بطرق الملاحة العطالية *inertial navigation*. ينجز التثليث الجوي *aerotriangulation* بدقة، بإستخدام ليس أكثر من أربع نقاط مراقبة مرجعية، وفي ظروف معينة تكفي نقطة واحدة. تكون هذه الطريقة فعالة في المناطق الصعبة الوصول إليها.

4.16.7 تطبيقات خاصة *Special Applications of GPS*

إن التطبيقات الممكنة لنظام ال *GPS* في مجالات الهندسة والعلوم الأرضية *geoscience* غير محدودة. أمثلة إضافية هي:

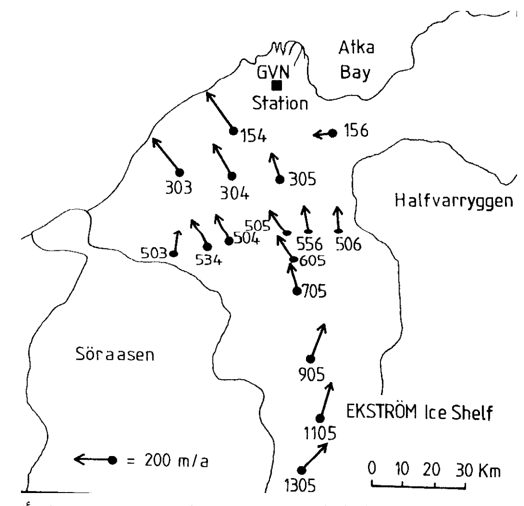
- مسح خطوط السكة الحديدية
- ملاحة العربات لزيادة إنتاجية المحاصيل الزراعية
- جرد الطرق السريعة *highway inventory*
- إدارة الغابات
- رصد العربات (شاحنات النقل أو السيارات العامة كسيارات الإسعاف والخاصة الحديثة)

يتم هنا التنويه على

- جيوديزيا الجليد *glacial geodesy*
- نقل المعلومات الزمنية *time transfer*
- الأقمار الصناعية التي تحمل لواقط *GPS*.

يمكن إستخدام ال *GPS* في أبحاث المحيط المتجمد الشمالي لتعيين ومراقبة تحركات الجليد. فلإشتقاق عناصر الحركة (السرعة والسمت) من قياسات مكررة طوال سنوات تكفي عندها قراءات شبه لحظية *quasi-online* خلال إنتقال عربة خاصة فوق الجليد أو أثناء هبوط طائرة مروحية لفترة قصيرة.

يمكن الحصول، في الطريقة النسبية، على دقة أقل من الديسيمتر خلال قياس لفترة أقل من الساعة الواحدة (وهذا يتعلق بالمسافة)، بحيث يمكن الحصول على نتائج صحيحة بعد شهر واحد. الشكل *4.54* يبين مثالا على ذلك.



شكل *4.54*: إتجاه حركة الجليد من قياسات ال *GPS* في شمال ألمانية.

يعتبر ال *GPS* إحدى الطرق الفعالة لتأمين تزامن الساعة الدولي لغاية دقة *10 ns* نانو ثانية. ويمكن التوصل لدقة *1 ns* على مسافات قارية. يرصد زمن وصول الإشارة نفسها من قمر واحد على محطتين معلومتين ويقارن مع زمن الساعات المرجعية المحلية. يجب حساب زمن إنتشار الإشارة بين القمر والمحطة، إنطلاقا من إحداثيات المحطتين الدقيقة وإحداثيات القمر الصناعي، وذلك في نفس الجملة الإحداثية *WGS84*. إن خطأ مقداره *30 cm* في موقع المحطة يدخل كخطأ مقداره *1 ns* في جملة أخطاء النظام *error budget*. إن تأثير أخطاء المدار يتبع كما رأينا العلاقة التقريبية *4.79*، لذلك تلزم دقة مدار *1 m* من أجل *1 ns* زمن إرسال إلى مسافة *5000 km*. هناك حاليا في الأسواق لواقط مخصصة لنقل الزمن. وتتحسن الدقة عن طريق الخدمة الدولية للجيوديناميك بواسطة ال *IGS GPS*.

تاتي تطبيقات ال *GPS* الفعالة جدا في مجالات الأبحاث العلمية الأرضية من خلال إستخدام ال *GPS* في الأقمار الصناعية التي تدور قريبا من الأرض *near earth orbiting satellites*. يمكن لمعطيات أجهزة ال *GPS* في تلك الأقمار أن تفيد بما يلي:

– تعيين دقيق لمواقع أقمار الإستشعار عن بعد، وبشكل رئيسي أقمار قياس الإرتفاعات *altimetry satellites*

– تعيين دقيق لمواقع ومسارات الأقمار التي تدرس حقل الجاذبية الأرضية

– تحليل إشارات ال *GPS* التي تعبر مناطق الغلاف الجوي العالية قبل عبورها الطبقات الدنيا، وذلك لأغراض البحث العلمي. إحدى الأمثلة هي مهمة القمر *TOPEX/POSEIDON* (الفرنسي الأمريكي المشترك) للإستشعار عن بعد، الذي تم إطلاقه في آب *1992*.ويحمل أيضا قوائس إرتفاعات *altimeters*. هناك مهمات تخطط لحمل لواقط *GPS* منها:

القمر الصناعي *ARISTOTELES* لقياس تغيرات الجاذبية، مسبر الجاذبية *GRAVITY PROBE B* لأغراض رسم مخطط حقل الجاذبية ودراسة النسبية العامة والمفترض إطلاقه في أواخر التسعينات، *EOS-A & EOS-B* للتوضع وأبحاث الغلاف الجوي، و *EUROPEAN POLAR PLATFORM* لأغراض التوضع والجيوديزيا العالمية والمفترض إطلاقه في أواخر التسعينات أيضا ... .

4.16.8 نظام الملاحة العالمي السوفييتي *Glonass*

قام الإتحاد السوفييتي منذ السبعينات بتطوير نظام ملاحي مشابه من ناحية التصميم لنظام *GPS* تحت إسم نظام الملاحة العالمي بالأقمار الصناعية *Global Navigation Satellite System GLONASS*. كانت المعلومات المنشورة من قبل الجهات السوفيتية الرسمية قليلة جدا حتى السنوات الأخيرة. بدأ السوفييت بنشر معلومات عن النظام عام *1988* وعرضه

للإستعمال الدولي. تم توقيع إتفاقية بين الجهتين الأمريكية والسوفيتية للتمكن من الإستفادة المشتركة لكلا النظامين لأغراض الملاحة المدنية، وكان ذلك تشجيعا لمصنّعي اللواقط لإنتاج لواقط يمكن أن ترصد إشارات كلا النظامين.

لقد صرح منذ البداية أنه لن يصار إلى تخفيض الدقة المفتعل، على عكس الحالة في *GPS* بواسطة *SA*. الجدول *4.16* يبين مقارنة بين النظامين.

	GLONASS	GPS
عدد الأقمار	21+3	21+3
عدد مستويات المدارات	3	6
ميل المدار	64.8°	55°
إرتفاع المدار	19 100 km	20 180 km
فترة دوران القمر	11 h 15 min	12 h
الرصد الأرضي المتكرر تمثيل التقويمات	كل ثمانية أيام نجمية *9* وسائط (موقع، سرعة، تسارع) في نظام *ECEF*	كل يوم نجمي عناصر كيبلر وعوامل الحساب
نظام جيوديزي مرجعي	SGS 85	WGS 84
القاعدة الزمنية	زمن نظام *GLONASS*	زمن نظام ال *GPS*
التصحيح الزمني بالنسبة ل	UTC(SU)	UTC(USNO)
نقل المعطيات الأولية للمدارات	*2.5* دقيقة	*12.5* دقيقة
تقسيم إشارة القمر	تقسيم التردد	تقسيم الشيفرة
التردد الأول *L1*	1.602-1.615 MHz	1.575 MHz
التردد الثاني *L2*	1.246-1.256 MHz	1.228 MHz
الشيفرات	نفسه لكل الأقمار، *C/A-code* على الموجة *L1* و *P-code* على كلا الموجتين *L1* و *L2*	*C/A-code* على الموجة *L1* و *P-code* على كلا الموجتين *L1* و *L2*
تردد الشيفرة	*C/A-code* تردده *0.511 Mhz* *P-code* تردده *5.11 MHz*	*C/A-code*: *1.023 MHz* *P-code*: *10.23 MHz*
معطيات الساعة	إنحراف الساعة إنحراف التردد	إنحراف الساعة إنحراف التردد وتغيراته

جدول *4.16*: مقارنة بين نظامي ال *GLONASS* و *GPS*.

أهم الإختلافات والميزات هي:

a– مدارات الأقمار: كلا النظامين يتألفان في حالتهما النهائية من *24* قمر. تتوزع أقمار نظام ال *GPS* على ست مستويات بينما أقمار نظام *GLONASS* (من نوع *Cosmos*) على ثلاثة مستويات كل يحوي *8* أقمار. تتكرر الرصودات كل *8* أيام نجمية (*17* دورة)، أي أن الأقمار الصناعية تعبر فوق المواضع نفسها من الأرض كل ثمانية أيام. كلا النظامين سيؤمنان تغطية مشابهة عند إكتمال عدد أقمار ال *GLONASS* إلى *24*.

b– إشارات الأقمار الملاحية: إنشاء الإشارة الملاحية متشابه في كلا النظامين *GPS* و *GLONASS*، حيث يتم البث فيه على ترددات الحزمة *L*. وتضمّن الإشارات بشيفرتين *two binary codes* وبالخبر الملاحي. على خلاف نظام ال *GPS* ترسل أقمار نظام ال *GLONASS* إشارات حاملة بترددات مختلفة حيث يكون التردد L_1:

$$f_{L1} = f_0 + (k+1)\Delta f_{L1} \qquad 4.103$$

حيث $k=1,2,\ldots,24$، و $f_0=1.602\ Mhz$ و $\Delta f_{L1}=0.5625\ Mhz$. ترتبط الموجتين L_1 و L_2 بالعلاقة

$f_{L1}/f_{L2}=9/7$.   4.104

لاتحتاج الأقمار أن تتميز بشيفرة خاصة وحيدة كما في ال *GPS*. إن طول موجة الشيفرة أقل منه في ال *GPS* لذلك تكون دقة القياس بها أخفض. مجالات الترددات متقاربة بحيث يمكن بناء أجهزة بهوائيات ومضخّمات إشارة تستقبل الترددات من كلا النظامين، رغم أن معالجة الإشارة تكون مختلفة.

c– المعلومات الملاحية: تضمّن المعلومات الملاحية على الموجة الحاملة بتواتر *50 bit/sec*. يبلغ طول الجزء الواحد *2* ثانية. تتشكل المعطيات الكاملة بإطار رئيسي يطول فترة *2.5* دقيقة، ويتألف من خمسة إطارات يدوم كل منها مقدار *30* ثانية. تحوي المعلومات الملاحية مثلا على:

– إحداثيات القمر رقم *i* في جملة مرجعية جيومركزية في الزمن المرجعي (غرينويتش)

– مركبات شعاع السرعة للقمر رقم *i*

– مركبات شعاع التسارع مسبب بتأثير جاذبية الشمس والقمر

– تصحيح الزمن إلى زمن نظام *GLONASS* المرجعي من أجل القمر رقم *i*

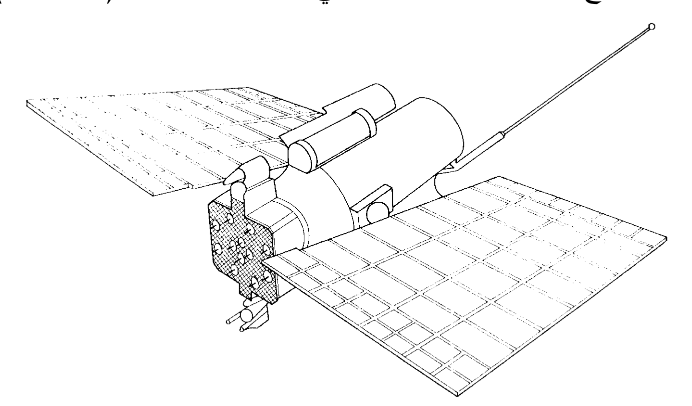
– معلومات عن تاريخ اليوم، أرقام تعريف الأقمار وحالة النظام.

كما في ال *GPS* تحوي التقويمات في *GLONASS* على معلومات دقيقة عن موقع وحالة كل قمر بشكل خاص ومعلومات أقل دقة عن مواقع كل أقمار النظام. تجدد المعلومات الدقيقة كل نصف ساعة. تعطى إحداثيات الأقمار في النظام المرجعي السوفييتي *Soviet Geodetic system SGS 85*.

يقع مركز المراقبة الأرضي في موسكو. وتتوزع محطات المراقبة والقيادة على أراضي الإتحاد السوفييتي، وبالتالي هناك نقص بالتغطية العالمية. يتم بث وسائط الملاحة والقيادة مرتين باليوم إلى كل قمر.

تعتمد إشارات النظامين *GPS* و *GLONASS* على نظامين زمنيين مختلفين قليلا. يرتبط نظام ال *GPS* بالزمن الدولي *UTC* المدقق من قبل المرصد الأمريكي *U.S. Naval Observatory* $UTC_{(USNO)}$، بينما يرتبط نظام *GLONASS* بالزمن الدولي المدقق من الإتحاد السوفييتي $UTC_{(SU)}$. يمكن أن تصل الفروقات بين المقياسين إلى عشرات من الميكرو ثانية.

d– حالة النظام: أطلق أول قمر في نظام *GLONASS* عام *1982*. وبعدها مرتين كل سنة، في كل مرة ثلاث أقمار دفعة واحدة، بواسطة الصاروخ *PROTON* من محطة بايكونور *Baijkonur*. يتخذ الصاروخ، كمرحلة أولى، مدارا دائريا وسطيا على إرتفاع *200 km*، ثم ينقل على مدار إهليلجي صاعد إلى أبعد نقطة في مدار الأقمار عن الأرض *apogee* وهي على مسافة *19 200 km*. تؤمّن عندها مواقع الأقمار الثلاثة في مداراتها بواسطة قوة دفعها الخاصة. تم إطلاق أكثر من *50* قمرا حتى الآن. تتراوح ديمومة القمر سنتين، وفي أغلب الأحيان أقل (شكل *4.55*).



شكل *4.55*: تمثيل لأحد أقمار نظام *GLONASS*.

ترقّم الأقمار وفق عدة مقاييس. إضافة إلى رقم القمر المميّز العالمي *ID number*، تعطى الأقمار أرقاما في سلسلة أقمار *COSMOS*، أرقام خاصة بنظام *GLONASS*، رقم موقع القمر في المدار، ورقم القناة. يميّز عادة القمر برقم القناة.

e– دقة النظام: حسب مركز المعلومات العلمية للقوى الجوية السوفييتية فإن النظام يملك نوعين من الإشارات الملاحية، الإشارة الملاحية ذات الدقة النظامية *SP*، وإشارة ملاحية عالية الدقة *HP*. إن خدمات التوضع والزمن المؤمّنة من الإشارة *SP*، لكل المستخدمين المدنيين، تعطي دقة توضع أفقية *57-70 m* (بإحتمال *99.7%*)، دقة تعيين إرتفاع *70 m* (بإحتمال *99.7%*)، دقة قياس مركّبات شعاع السرعة *15 cm/s* (بإحتمال *99.7%*)، ودقة الزمن لغاية *1 microsecond* (بإحتمال *99.7%*). إن تطبيق الطرق التفاضلية بالقياس وإستخدام طور الموجات يمكن أن يعطي دقة تصل إلى دقة نظام ال *GPS*. في الوقت الحالي يقدّم بعض مصنعي الأجهزة لواقط مشتركة جيدة بإمكانها معالجة إشارات كل من النظامين (مثل منتجات *3D Navigation*)، مما يرفع فعالية تطبيقات الأقمار الصناعية في كل المجالات.

قائمة المراجع

- *Bauer Manfred: Vermessung und Ortung mit Satelliten, Wichmann Verlag Deutschland Karlsruhe 1989.*
- *Bretterbauer Kurt: Hoehere Geodaesie, Vorlesung des Institutes fuer Theoretische Geodaesie der TU Wien,1994.*
- *Hamoui Haysam: Beitrag zur Untersuchung von Ionosphaerenmodellen bei GPS Messungen, GPS Dissertation an der TU Wien 1995.*
- *Hofmann-Wellenhof B.: GPS in der Praxis, Springer Verlag Wien, New York 1994.*
- *Seeber Guenter: Satellite Geodesy, de Gruyter, Berlin New York 1993.*
- أعداد مجلة *GPS World* العلمية الإختصاصية.

======================

عنوان المؤلف

Dr. techn. Haysam Hamoui
Trondheimgasse 4/1/7
1220 Vienna
Austria
Tel. 0043 1 9226684
E-Mail: hamoui@chello.at

Home Page: http://members.chello.at/hamoui